

AKADÉMIAI DOKTORI ÉRTEKEZÉS

**LOMBOS FAFAJOK GŐZÖLÉssel TÖRTÉNŐ
FAANYAGNEMESÍTÉSE ÉS A FAANYAGOK
FOTODEGRADÁCIÓJÁNAK VIZSGÁLATA**

Tolvaj László

Sopron

2005

Tartalomjegyzék

1.Bevezető, célkitűzés	2
2.A szakirodalom áttekintése	5
2.1. Gőzölési vizsgálatok	5
2.2. Fotodegradációs vizsgálatok	9
3. A vizsgált faanyagok és a vizsgálati módszerek	15
3.1. Gőzölési vizsgálatok	15
3.2 Fotodegradációs vizsgálatok	18
4. A vizsgálatok eredményei	22
4.1 Gőzölési vizsgálatok	22
4.1.1. Akácgőzölés	22
4.1.2. Bükkgőzölés	35
4.1.3. Gyertyángőzölés	42
4.1.4. Csertölgőgőzölés	46
4.1.5. A vízgőz jelenlétének szerepe a faanyag gőzöléssel történő színváltoztatásakor	48
4.1.6. A gőzölt akác faanyag időjárás-állóságának vizsgálata	56
4.2. Fotodegradációs vizsgálatok	58
4.2.1. A fotodegradáció során bekövetkező változások követése az infravörös különbségi színekép segítségével	60
4.2.2. A diffúz reflexióval mért infravörös színekép függése a felület tulajdonságaitól	66
4.2.3. A napsugárzás mesterséges fényforrásokkal történő imitálásának problémái	71
4.2.4. A geszt és a szijács korai és késői pásztája fotodegradációjának vizsgálata	82
4.2.5. A Kubelka-Munk elmélet korlátai faanyagok vizsgálatánál	87
Tézisek	93
Az eredmények ipari és mérés technikai hasznosítása	98
Irodalomjegyzék	100
Mellékletek	111

1. Bevezető, célkitűzés

A faanyag színbeli tarkasága a természet által alkotott nagyszerű színharmóniák egyike (Kucera és Katuscak 1992). A vörös és a sárga közötti színárnyalatok a szem számára kellemes, meleg színek érzetét keltik (Masuda 2001), a faanyag színe pedig ebbe a tartományba esik. Mindez párosul az átmetezett pászták néha kuszának látszó, de mégis csodálatos, egyedi rajzolatával. A fának ez a nagyszerű színe sérülékeny. A beltéri világos faburkolatok, bútorok az évek során sötétednek, vörösesbarna árnyalatot vesznek fel. Ahol rendszeresen fény éri őket, ott kifakulnak. A napfény hatásának közvetlenül kitett faszerkezetek hamar elveszítik eredeti színüket és elszürkülnek, különösen akkor, ha vízpára vagy csapadék is éri őket.

Nem mindegyik faanyag színe kellemes a szem számára, míg másoknál a csodálatos rajzolat részben vagy teljesen hiányzik. Néhány fafajnál viszont a nagyon erős színbeli tarkaság már inkább zavaró, mintsem harmonikus. Ilyenek például az éles határral egymás mellett lévő sötét és világos szövetek.

A környezetét az igényeinek megfelelően formálni igyekvő ember számára a fent említettek kétféle feladatot fogalmaznak meg. Megtalálni azokat a módszereket, melyekkel a faanyag színét „konzerválni” lehet. Ehhez viszont előbb fel kell tární és meg kell érteni a fény károsító hatásának (a fotodegradációnak) és a termikus degradációnak a mechanizmusát. Másrészt szisztematikusan meg kell vizsgálni azokat a módszereket, melyekkel a nem tetszetős faanyagok színe kellemessé és tartóssá változtatható, továbbá a nemkívánatos kontrasztok harmonikussá tehetők, a rajzolat láthatóságának megtartása mellett. Az is fontos szempont, hogy a színmodifikáció során ne alkalmazzunk toxikus felületkezelő anyagokat.

A gőzölés, mint színváltoztató hatás már régóta ismert a faiparban. A folyamat történhet nagyméretű kamrákban, harangokban (100°C alatt), és nyomásálló gőzölő hengerekben (100°C fölött). A gőzölés megvalósítható közvetlen gőzbevitellel, illetve a gőznek fűtő közegként történő felhasználásával. A második esetben a gőzt a kamra alján lévő víz felfűtésére használják, zárt csőrendszerben keringetve. (Ez a gőz nem jut be a gőzölő térbe.) Ekkor a gőzölő tér számára a gőzt a felfűtött víz párolgása biztosítja. Ilyenkor a zárt térben garantáltan telített vízgőz alakul ki. Gőzölésnél fontos, hogy a gőzölő térben telített vízgőz legyen, ellenkező esetben a telítetlen gőz vizet vesz fel a faanyagból, és a gyors vízvesztés repedéseket okozhat. A közvetlen gőzbetáplálásnál csak folyamatos kontrol és gőzbevitel-szabályozás mellett garantált a gőz telítettsége. Ezért az ilyen típusú, kontrol nélküli régi gőzölőkben gyakori a faanyag károsodása, és a kívánt szín reprodukálása sem biztosítható.

Az is régi tapasztalat, hogy amíg gőzölésnél az akác színe nehezen reprodukálható, addig a bükk faanyag kevésbé érzékeny a gőzölési körülményekre.

A több évtizedes tapasztalatok ellenére eddig nem történt meg a gőzölési hőmérséklet, idő és a színjellemzők kapcsolatának objektív meghatározása.

Hazánk erdőterületének 86,4 %-át lombos erdők alkotják. Ezen területek fahozamának magas feldolgozottságú, nagyértékű fatermékekkel alakítása fontos gazdasági érdek. Az erdőterület 22,3 %-át kitevő akác, a 11,4 %-nyi cser, a 6,1 %-nyi bükk és az 5,6 %-nyi gyertyán populációk fatermése gőzöléssel nagyobb értékű faanyaggá nemesíthető. (Az adatok forrása: ÁESz Adattár, 2003. 01.01.) Ezen tanulmány egyik célja, hogy rámutasson a lombos fafajok nemesítésénél a gőzölési paraméterek színváltozást befolyásoló hatására, és a kívánt szín eléréséhez szükséges gőzölési paraméterértékek fafajonkénti kiválasztásának jelentőségére.

Az akác faanyag kiváló fizikai és mechanikai tulajdonságai révén egyes trópusi fafaanyagok helyettesítője lehet, amennyiben a színét gőzöléssel ezeknek a faanyagoknak a rendszerint sötét színéhez hasonlóvá tudjuk tenni. Meg kívánjuk határozni ezeket a gőzölési paramétereket. Ez a munka két szempontból is nagy jelentőséggel bír. A világban és hazánkban is egyre nagyobb területen termesztett akác faanyagból (Rédei 1997) gőzölés után, a jelenleginél lényegesen értékesebb termékek előállítása várható. Az is fontos szempont, hogy a kidolgozandó gőzölési módszerrel jelentős trópusi erdők menekülhetnek meg a kiirtástól, javítva földünk ökológiai egyensúlyát.

Az álgesztes bükk faanyag színbeli tarkasága Európaszerte komoly kihívás a faipar számára. A probléma megoldásával, részvételünkkel egy EU-6-os CRAFT projekt foglalkozik. A cser faanyag feldolgozása során sok gondot okoz az igen széles világos színű szíjács felhasználása, melynek mechanikai tulajdonságai alig maradnak el a jóval sötétebb gesztétől. A gyertyán kiváló keménységű, tulajdonságai alapján bútorgyártásra alkalmas faanyag, de jellegtelen szürkésfehér színe jórészt tűzifává degradálja. Gőzöléssel a fent nevezett faanyagok kedvezőtlen színbeli tulajdonságai lényegesen javíthatók. Munkánkban feltárjuk az ehhez szükséges gőzölési paramétereket.

A faanyagok fotodegradációja már régóta foglalkoztatja a faanyagtudomány és a faipar szakembereit. A kutatások egy része a mechanizmus feltárására irányul, míg mások a védelem tökéletesítésén szorgoskodnak. A felületkezeléskor felhasznált védőanyagok alkalmazása persze újabb problémákat vet fel, a védőanyagok degradációját és kimosódását, ami komoly környezetkárosító folyamat. Az erdő és favagyonnal való gazdálkodás szempontjából nem közömbös, hogy a beépített faanyagok élettartamát sikerül-e kellő

mértékben meghosszabbítani. A fotodegradáció jelenségének feltárása, megismerése a több évtizedes kutatómunka ellenére, még mindig komoly kihívás a kutatók számára. Nehézséget jelent, hogy a jelenség nem vizsgálható tisztán, egyedül. Természetes körülmények között a napsugárzás hatása nem választható el a termikus hatástól, és a levegő páratartalmának hatásától sem. Ráadásul ezeket a hatásokat meghatározó paraméterek egy nap folyamán állandóan változnak a napsugárzás intenzitásával együtt, és akkor az éjszakát és a borús napokat meg az évszakok változását még nem is említettük. Ezért a fotodegradációt elsősorban laboratóriumban mesterséges, reprodukálható körülmények között imitálják. A termikus degradációt itt sem lehet leválasztani a fotodegradációról. Bár a kutatók többnyire egyetértenek abban, hogy laboratóriumi hőmérsékletek mellett a termikus hatás nem jelentős. A legújabb vizsgálatok tükrében úgy tűnik, felül kell vizsgálni ezt a régóta igaznak hitt elgondolást, hogy a természetes állapotoknak megfelelő hőmérsékleteken (10-60°C) a termikus degradáció hatása a fotodegradáció mellett elhanyagolható.

A faanyag bonyolult kémiai összetétele miatt sem egyszerű dolog a fotodegradáció során lejátszódó kémiai folyamatok megértése. Ezért a modellvegyületek alkalmazása a folyamatok egy-egy részének feltárásakor jó szolgálatot tesz. A fotodegradációnak nevezett változás önmagában is összetett, hiszen a széles hullámhossztartományt átfogó napsugárzás fotonjainak jelentősen eltérő energiája sokféle kémiai folyamat generálására alkalmas. Ezért a hullámhosszfüggés vizsgálata sok kutatót foglalkoztat. Napjainkban a lézerek fényforráskénti alkalmazásával ez a terület eredményesen kutatható. Az optikai vizsgálatok szempontjából külön nehézség, hogy a faanyag a fény számára nem átjárható. Ezért a felületi reflexiós mérések előnyt élveznek. Annál is inkább, mert éppen abból a felületi rétegből hoznak információkat, melyeket a fotodegradáció érintett. Nagy hátrány, hogy a reflexiós vizsgálatok nagyon érzékenyek a felületi érdesség-változásokra. A faanyag felületi érdessége pedig rendkívül változatos.

A fentiekben leírt sokrétű és összetett problémára tekintettel ezen munkában a fotodegradáció néhány részproblémájának vizsgálatát tűztük ki célul. Összehasonlítjuk a mesterséges fényforrások hatását a napsugárzás hatásával. Meghatározzuk, hogy melyek alkalmasak a napsugárzás imitálásra, és milyen feltételek mellett teljesítik ezt. Megvizsgáljuk a faanyag különböző szöveteinek (geszt és szíjács korai és késői pásztája) a fotodegradációval szembeni ellenálló képességét. Feltárjuk az infravörös különbségi színeképek korrekt meghatározását gátló tényezőket. E hatások minimalizálásával olyan minőségű különbségi színeképeket állítunk elő, melyek új információkat adnak a fotodegradáció okozta kémiai változások finomszerkezetéről.

2. A szakirodalom áttekintése

2.1. Gőzölési vizsgálatok

A hidrotermikus fanemesítés, a faanyag gőzölése közel fél évszázados múltra tekint vissza. A módszer hatékonyságát nem csak előnyös színváltoztató hatása, hanem a faanyag mechanikai tulajdonságainak (pl. hajlíthatóság, forgácsolhatóság), a felhasználó számára kedvező irányú befolyásolása is indokolja. Az egyidejű hő - és nedvességhatásnak köszönhetően a faanyag színe jelentősen sötétedik, és vörös felé tolódik. Nem elhanyagolható a gőzölés azon jótékony hatása sem, mely szerint a folyamat során a rovar - és gombakártevők elpusztulnak. Az esztétikai követelmények szigorodása, az egyre növekvő minőségi elvárások mind jobban megkívánják az adott színre történő gőzölés szükségességét. Nagysorozatú gyártásnál, alkatrészpótlás ill. javítás esetén alapvető követelmény a színazonosság, a csereszabotosság. A szín reprodukálhatósága érdekében pontosan ismerni kell, hogyan változik a faanyag színezete, világossága egy adott hőmérsékleten történő gőzölés folyamán. Ennek ellenére az ipari gőzölőkben a gőzölési idő és gőzölési hőmérséklet kiválasztása korábbi tapasztalatok alapján történik, a feltétlenül szükséges színmeghatározásokat pedig vizuális összehasonlítással végzik (szubjektív színmeghatározás).

Az objektív színmérést ezidáig csak laboratóriumi körülmények között, a kutatómunkákban alkalmazták. Németh (1981, 1982, 1983, 1984, 1989) kezeletlen, szárított (hőkezelt), illetve napfény hatásának kitett faanyag CIELAB színrendszerben történő színmeghatározására, illetve színváltozásának vizsgálatára irányuló kutatásai alapozták meg ezt a tudományterületet.

A CIELAB színingertér minden egyes színingerhez egy pontot rendelt az L^* , a^* , b^* térbeli derékszögű koordináta-rendszerben, ezeket szíinkoordinátáknak nevezzük (Lukács Gy. 1982.). Az a^* tengely pozitív irányban a vörös, negatív irányban a zöld színezetet jelenti, a b^* tengely pozitív irányban a sárgát, negatív irányban a kékét. Az a^* , b^* tengelyekre merőlegesen helyezkedik el az L^* tengely, amelyen a színinger világosságát ábrázoljuk. Az L^* , a^* , b^* koordináták a spektrofotométerrel meghatározott alap színinger-összetevőkből számíthatók.

A gőzölés színváltoztató hatásának leírásával először a magyar szakirodalomban találkozunk. Dessewffyné (1964) és kollégái a Faipari Kutató Intézetében a gőzölésnek az akác faanyag fizikai-mechanikai tulajdonságaira gyakorolt hatásával foglalkoztak. Laboratóriumi körülmények között, 100°C feletti hőmérsékleteken gőzölték a faanyagot

és azt tapasztalták, hogy a minták 0,1-0,4 MPa gőztúlnyomás mellett fokozatosan sötétre színeződtek.

Gőzölés hatására bekövetkező színváltozás objektív mérésével először Stubenvoll (1984) munkájában találkozhatunk. Akác próbatesteket gőzölt 100°C-on, bükköt 70 és 100°C-on, egy-egy mintacsoportot 6, 9, 12, 24 és 48 óráig. A színmérést Momcolor-D műszerrel végezte, és megállapította, hogy a vizsgált faanyagok egyikénél sem lépett fel számottevő telítettség és színezet-változás, a folyamatot a világossági tényező változásával jól lehetett jellemezni. A kondenzvíz akác esetében 0-9 óráig erősen sárga színű, ezután átlátszó volt. Megállapította, hogy a gőzölés kezdeti szakaszában a könnyen oldódó színezékanyagok, illékony vegyületek kioldódtak, és az akác jellegzetes szaga is csökkent.

Németh (1998) összehasonlította a faanyagok termikus hatásokra bekövetkező színváltozásait extrakt anyagok kivonása előtt és után. Megállapította, hogy a színváltozást döntően az extrakt anyagok okozzák. Oxidatív és nem oxidatív közegben elvégezve a kísérleteket azt tapasztalta, hogy oxigén jelenlétében erőteljesebben változik a szín.

A kezeletlen fafelület objektív színmérésével foglalkozó első leírások Sulliran (1967) nevéhez fűződnek. Németh (1981/a, 1982, 1983) kezeletlen faanyagra vonatkozó mérései szerint a világossági koordináták (L^*) jól követik a vizuálisan megállapított sorrendet. Megállapította, hogy a kezeletlen faanyagok színezeti szöge (H^*_{ab}) és világossága (L^*) között lineáris összefüggés áll fenn, s emiatt a nagy pontosságot nem igénylő szín összehasonlításokhoz elegendő a világossági értékek figyelembe vétele. A világosságra vonatkozó információt csak az Y színínger-összetevő hordozza, ezért elegendő csak az Y színínger-összetevők összehasonlítása. Phelps és Ginnes (1983/a,b) a kezeletlen faanyag felületének színmérésével foglalkozott, különös tekintettel a rajzolat jelentőségére, mely nagyon fontos a minőségi furnérgyártásnál. A termofa előállításánál szintén jelentősége van a színmérésnek a megfelelő kezelési paraméterek meghatározásakor (Patzelt (2003)

A természetes faanyag színe a sárga-vörös tartományba esik. Akác esetében a szín sárgatartalma nagy, vörös tartalma kicsi. A fafajra jellemző színt a járulékos anyagokban lévő kromofor szerkezetek alakítják ki, s ezek nagyfokú érzékenysége a felelős a színváltozásért is (Németh 1998.). Az akác fája járulékos anyagaiban jelentős mennyiségben tartalmaz színképző vegyületeket. Gőzölés hatására az akác színe jelentősen sötétedik és vörös felé tolódik. A trópusi fák felhasználásával kapcsolatos ellenállás megnövelte az akác szerepét, mivel gőzöléssel azokhoz hasonló szín érhető el.

Ma Európában Magyarország rendelkezik arányaiban a legtöbb akácerdővel, s ugyancsak a mi országunk rendelkezik a legtöbb tapasztalattal ezen fafaj felhasználását illetően. Fontos lenne tehát, hogy a magyar akácfa gőzölve, szárítva, magas színvonalon megmunkálva jelentkezzen az európai piacokon. (Molnár S. 1998.)

Molnár és munkatársai (Molnár 1979; Kovács és Molnár 1980; Molnár és munkatársai 1994; Molnár 1998) akácgőzöléssel kapcsolatos kísérleteket végeztek, melyek során a faanyag műszaki tulajdonságait vizsgálták. Az atmoszférikus nyomáson történő gőzölés hatásainak feltárása érdekében laboratóriumi gőzöléseket hajtottak végre 95°C-on. Fizikai és mechanikai vizsgálatokat folytattak természetes és hőkezelt akácfával. Megállapították, hogy az ide vonatkozó szabvány nem ad használható információkat az akácfa gőzölésének elvégzéséhez. Ehelyett megfogalmazták az akácfa atmoszférikus gőzölésének technológiai előírásait. A fizikai és mechanikai vizsgálatok azt mutatták, hogy az akácfa atmoszférikus gőzölése során a faanyag tulajdonságai kis mértékben megváltoznak. A sűrűség 6-8 %-kal nő, a szilárdsági jellemzők közül egyesek (pl. a statikus hajlítószilárdság) csökkenő, mások (pl. ütő-hajlító szilárdság) növekvő értéket mutatnak.

Richter és Kühl (1998) szerint az akác faanyag gőzölése során a színváltozást az okozza, hogy a járulékos anyagok jelentős mennyiségben kimosódnak, illetve kémiai összetételükben megváltoznak. Megállapították, hogy a gőzölés ipari megvalósítása során figyelmet kell szentelni a folyamatot kísérő erősen savas természetű gőzlecsapódásnak.

A gyakorlatban ezidáig nedves, vagy ehhez közel álló nedvességtartalmú faanyagot gőzöltek. A faanyag körüli telített gőztér elsősorban a vízvesztés megakadályozását szolgálja. Az elszíneződés sebességét és mértékét döntően az alkalmazott hőmérséklet határozza meg. Magasabb hőmérsékleten a termikus folyamatok felgyorsulnak, így intenzívebb lesz a színváltozás. A gőztelítettség kritériuma a megfelelő nyomás meglétét is megköveteli. Gyakorlati szempontból megkülönböztetünk atmoszférikus nyomáson történő ($T < 100^{\circ}\text{C}$) és túlnyomásos gőzölést ($T > 100^{\circ}\text{C}$). Ipari gőzölés esetén jellemző a légköri nyomáson történő gőzölés. Tapasztalatok alapján nem javasolt a 120°C-nál magasabb hőmérsékletek alkalmazása, mert a бүтүреpedések megsokszorozódnak (Molnár, 1976).

A legújabb kutatási eredmények (Horváth Sz.E.2000, Horváth Sz.E.-Varga D. 2000) szerint az akác faanyag gőzölése során bekövetkező színváltozás jól jellemezhető a világosságváltozással. A világosság változását sikerült két független változót, a gőzölési

hőmérsékletet és a gőzölési időt tartalmazó függvénnyel leírni. A korrelációs indexek értékei azt mutatják, hogy a számítással meghatározott és a gőzölés során kialakuló világosságváltozás között nincs jelentős eltérés. Ez nagy előrelépés az ipari gőzölések szempontjából, hiszen a célként kitűzött világossági értékhez számítással megállapítható a szükséges gőzölési hőmérséklet és gőzölési idő.

A gyakorlati tapasztalatok azt mutatják, hogy az akác faanyag gőzölésekor a kívánt szint gyakran nem sikerül elérni. Ennek ellenére még nem született átfogó munka a gőzölés paramétereinek a színváltozást befolyásoló hatására vonatkozóan. Hasonló a helyzet a rakaton belüli színbeli tarkaság okának felderítésénél is.

A bükk faanyag gőzölése az iparban elterjedt gyakorlat. Az enyhén vörös árnyalat elérése érdekében végeznek gőzölést. A gőzölés hatására bekövetkező színváltozás szisztematikus vizsgálatára vonatkozóan nem találtunk adatokat a szakirodalomban. A publikált vizsgálatok döntő mértékben a gőzölt bükk faanyag fizikai és mechanikai tulajdonságaira vonatkoznak. Az ipar számára nemkívánatos színes álgeszt kialakulása egyre inkább foglalkoztatja a kutatókat, mivel a kitermelt bükk faanyagban egyre nagyobb lesz az álgeszt részaránya. A NyME Kémiai Intézetében napjainkban sikeres vizsgálatok folynak a színes geszt kialakulására vonatkozóan (Hofman T. és munkatársai 2002, Albert L. és munkatársai 2003, Hofman T. és munkatársai 2004). Kimutatták, hogy a színhatáron pH emelkedés jön létre, ami a lejátszódó enzimfolyamatok elengedhetetlen feltétele. Ebben a pH tartományban mindkét oxidációért felelős enzim (peroxidáz és a polifenol-oxidáz enzimek) aktivitása nagy. A színhatáron a kioldható fenoltartalom csökken, és a fenolok minősége is megváltozik. A színhatár előtt egy szűk szöveti sávban keletkeznek az álgeszt színes gesztesítő anyagai a fenolok oxidatív polimerizációjával.

A faipar számára nagy kihívás, hogy a fehér és a színes geszt közötti éles és alaktalan színhatárt csökkentse. Ehhez segítségül hívható a gőzölés. E témában egy EU-6-os CRAFT projekt indult a részvételünkkel. A csergőzölésre és a gyertyán faanyag gőzölésére sem a szakirodalomban, sem az ipari gyakorlatban nem találtunk példákat.

Célul tűztük ki, hogy szisztematikusan megvizsgáljuk a gőzölési paraméterek (gőzölési idő, hőmérséklet, nedvességtartalom) hatását a színváltozásra, és a színhomogenizálás lehetőségére. A gőzölt faanyag időjárás-állóságának vizsgálatát is fontos feladatnak tekintettük.

2.2. Fotodegradációs vizsgálatok

A napsugárzásnak kitett faanyagok felületén bekövetkező változások vizsgálata a szabadba kitett minták esetén sok nehézségbe ütközik. A napsugárzás intenzitása egy nap folyamán állandóan változik, de a nap állásának változásával egy év során is jelentős intenzitás-változások történnek. Ezek az eltérések egy alkalmasan számolt sugárzási átlaggal kompenzálhatók. A teljesen vagy részben felhős időszakok viszont hosszabb (1-2 éves) kitettség esetén lehetetlenné teszik a mintákat valóban ért napsugárzás kalkulálását. A szakirodalomban nem találtunk olyan munkát, mely kezelési időként valóban csak a napsugárzások órákat vette volna tekintetbe. A fenti nehézségek miatt a faanyagok fotodegradációját elsősorban mesterséges fényforrások alkalmazásával, megismételhető körülmények között szokták vizsgálni.

A kezelések hatására bekövetkező változásokat a (távoli) infravörös színek felvételével szokták detektálni. Az elmúlt évtizedben egyre inkább előtérbe kerül a színváltozás vizsgálata is. A színmérés alkalmazása területén Németh végzett úttörő munkát (Németh és Faix 1988/a, Németh 1989, Németh 1998). Napjainkban a fotodegradáció és a termikus degradáció kölcsönhatásának vizsgálatánál is fontos szerep jut a színmérésnek (Mitsui és munkatársai 2001, 2004/a, 2004/b, Mitsui és Tsuchikawa 2005)

Az infravörös spektroszkópiát először a fa fő komponenseinek elsősorban a ligninnek a vizsgálatára alkalmazták (Hess 1952, Marton és Sparks 1967, Sarkanen és munkatársai 1967.)

Marton a teljes visszaverődésen alapuló módszert alkalmazva adott ajánlást a lignintartalom és a cellulóztartalom változásának megfigyelésére. Mivel a nulla vonal (alapvonal) megadása mindig is nehéz probléma volt az infravörös spektroszkópiában, belső vonatkoztatási pontok megadásával tette egyértelműbbé a tipikus lignin illetve cellulóz abszorpciós sávok intenzitásának értékét. Lignin esetében az 1510 cm^{-1} -es aromás gyűrű sávot választotta, melyet az 1530 cm^{-1} -en mért értékhez viszonyított. A cellulóz esetében az 1310 cm^{-1} -es sávot választotta és az 1285 cm^{-1} -en mért értékhez viszonyította. A lignintartalom meghatározásához azóta is az aromás gyűrű 1510 cm^{-1} -es abszorpciós sávját használják. Sarkanen (1967) a különböző fafajok tulajdonságait vizsgálva megállapította, hogy a fenyőféléknél az eltéréseket a fafajok struktúrája között és a fajon belül is a különböző észter csoportok eltérése okozza.

Michell és munkatársai (1969) szintén az egyes fafajok közötti eltéréseket kutatták. Méréseik szerint az 1640 cm^{-1} -es sáv lényegesen erősebb a fenyőfélnél mint a lomblevelűeknél. A lignin sávjai közül az 1265 cm^{-1} -es a fenyőknél, az 1235 cm^{-1} -es pedig a lombos fafajoknál intenzívebb.

Chow (1972) a különböző pászták közötti eltéréseket vizsgálta négy fenyőféle esetében. Eredményei szerint a korai pászta abszorpciója mindig erősebb 1580 cm^{-1} -nél mint a késői pásztáé. Viszont az 1730 cm^{-1} -es sávra pont a fordítottja igaz, a késői pászta abszorpciója jelentősebb mint a korai pásztáé. Az 1730 cm^{-1} körüli sáv viszont a hemicellulóz acetyl és karboxil sávjának valamint a lignin aromás gyűrűje ketoncsoportjának az abszorpciójával azonosítható Marchessault (1962), Bolker és Somerville (1963) szerint.

Az időjárás viszontagságainak kitett fenyő mintákat vizsgáltak Hon és munkatársai (1983, 1984). A szabadba kitett és zárt térben ultraibolya sugárzással kezelt mintáknál egyformán azt tapasztalták, hogy a kezelések 1265 cm^{-1} és 1510 cm^{-1} hullámszám környékén abszorpció csökkenést okoztak míg 1720 cm^{-1} és 1735 cm^{-1} környékén abszorpció növekedés volt megfigyelhető. Ebből arra következtettek, hogy a szabadtéri öregedésért elsősorban az ultraibolya sugárzás a felelős. Belső viszonyítási pontként Hon a 895 cm^{-1} -en mért értéket használta, az 1265 cm^{-1} és az 1510 cm^{-1} környékén lévő sávot a lignin benzol gyűrűjének abszorpciójával azonosította.

A fent leírtakkal megegyező eredményre jutottak Dirckx és munkatársai (1987/a) is. A próbatest és a fényforrás közé $25\text{--}100\text{ }\mu\text{m}$ vastagságú fametszeteket helyeztek. Az infravörös színeképek segítségével kimutatták, hogy a fametszetek mint szűrők az ultraibolya sugárzást teljesen elnyelték ha a vastagságuk elérte a $80\text{ }\mu\text{m}$ -t. Hon és Ifjú (1978) a fény által keltett szabad gyökök vizsgálatával az ultraibolya fény behatolását $75\text{ }\mu\text{m}$ -nek, látható fényénél $200\text{ }\mu\text{m}$ -nek mérte. Kataoka és Kiguchi (2001) az infravörös színeképben még $500\text{ }\mu\text{m}$ mélységben is talált változást xenonlámpás besugárzás esetén, ha kellően hosszú idejű (1500 óra) besugárzást alkalmaztak. A jelenség magyarázata abban keresendő, hogy a fény hatására meginduló oxidációs folyamatok a fényenél lényegesen mélyebbre is behatolnak a faanyagba (Müller és munkatársai 2003).

Lombos fafajokból készült minták vizsgálatakor Hon és Feist (1986) kimutatta, hogy hasonló változások játszódnak le mint a fenyőfélnél esetében, viszont az 1510 cm^{-1} -es sávval párhuzamosan abszorpció csökkenést tapasztaltak 1600 cm^{-1} környékén is, mely szintén az aromás gyűrű abszorpciós sávja.

Dirckx és munkatársai (1987/b) a faminták ultraibolya besugárzását különböző gázokat tartalmazó térben végezték el, hogy megvizsgálják, követi-e oxidációs folyamat a degradációt. Lényeges eltérést az $1670\text{-}1800\text{ cm}^{-1}$ tartományban találtak. Nitrogénben történt besugárzásnál alig volt változás a fent említett tartományban. Levegőben már számottevő volt a változás, oxigénben viszont az abszorpció már majdnem megduplázódott 32 órás kezelés hatására. Tehát az ultraibolya fény degradáló hatását oxidációs folyamatok követik.

A legújabb vizsgálatok tükrében úgy tűnik, felül kell vizsgálni azt a régóta igaznak hitt elgondolást, hogy a természetes állapotoknak megfelelő hőmérsékleteken ($10\text{-}60^{\circ}\text{C}$) a termikus degradáció hatása a fotodegradáció mellett elhanyagolható. Mitsui és Tsuchikawa (2005) kimutatták, hogy alacsony hőmérsékleten (-40°C) a fotodegradáció mérhető hatása mind a színváltozásban, mind az infravörös színekép változásában messze alatta marad a megszokottnak.

Michell (1988/a) végzett vizsgálatokat annak eldöntésére, hogy a Kubelka-Munk összefüggés alkalmazható-e faminták és fatartalmú papír vizsgálatánál. A diffúz reflexiós technikával és a hagyományos módon előállított infravörös színeképek összehasonlításával igazolta, hogy nincs lényeges eltérés az egyes színeképek között. A K-M függvény gyakorlatilag megegyezik az abszorpciós színeképpel, melyet káliumbromid tablettás technikával vettek fel. Ezzel ellentétben Németh és Faix (1994) azt tapasztalta, hogy a lombos fafajoknál az $1164\text{-}961\text{ cm}^{-1}$ hullámszám tartományban a csúcsok $3\text{-}11\text{ cm}^{-1}$ értékkel eltolódnak a magasabb hullámszámok felé, amit a diffúz reflexiós technika anomáliájaként értelmeztek.

A számítógéppel támogatott diffúz reflexiós infravörös spektrofotométer alkalmazásának lehetősége a 20. század végén nagy lendületet adott a fa kémiai szerkezete változásának kutatásához. Lehetőség kínálkozott az egymásra halmozódó abszorpciós sávok jelentős részének szétválasztására és azonosítására. Úttörő munkát végzett a faliginin infravörös színeképének részletes feltérképezésében Faix és Beinhoff (1988). Az $1800\text{-}700\text{ cm}^{-1}$ tartományban ötvennégy abszorpciós sávot sikerült megkülönböztetniük. Megadták az egyes sávok relatív intenzitását is úgy, hogy a legintenzívebb sávhoz viszonyították őket, melynek értékét 100-nak választották.

A számítógépes függvényelemzés által kínált módszer a második derivált függvény meghatározása. A függvényderiválás módszere a helyi szélső értékek (esetünkben maximumok) helyének meghatározására szolgál. Segítségével Michell (1988/b) faminták és származékaik infravörös színeképét vizsgálta. Az általa talált főbb maximumok

megegyeznek a (Faix 1988)-ban leírtakkal, de néhány maximum helyében eltérések vannak. A szerző csak az intenzív sávokat értelmezte. A gyenge intenzitású sávoknál nem lehet eldönteni, hogy mi a zaj és mi a gyenge abszorpciós sáv. Véleményünk szerint ez a módszer nem alkalmazható a faanyag infravörös színekének jelentős tartományánál, mert az egymást sokszorosan átfedő sávok szuperpozíciójából csupán a deriválás matematikai módszerével, mechanikusan nem állapíthatók meg az egyes sávok. Ezt a kutatók is hamar felismerték, és az elmúlt években nem jelentek meg ilyen publikációk.

Az elvégzett vizsgálatok azt mutatják, hogy az optikai-spektroszkópiai módszerek közül az infravörös spektroszkópia adja a legtöbb információt a fa kémiai szerkezetéről és annak változásáról. Probléma viszont, hogy az infravörös színek nagyon összetett és így nehezen, nagy körültekintéssel értékelhető. Különös gondosságot igényel a színek felvétele, ha valamilyen változást akarunk kimutatni a színek összehasonlításával.

A szakirodalom tanulmányozása során arra a következtetésre jutottunk, hogy a spektroszkópia lehetőségeinek feltárására a faipari kutatásokban átfogó munka nem készült. A faanyagok vizsgálatára legalkalmasabb diffúz reflexiós technika alkalmazásának lehetőségei és feltételei nem kidolgozottak. A mérések kivitelezésekor ugyanis komoly kihívást jelent, hogy a reflektáló felület felületi érdességétől és a mérőrendszer geometriai elrendezésétől rendkívüli mértékben függő fényszórást az abszorpció mértékével csak együtt tudjuk mérni. Amennyiben a kezelés előtti és utáni méréskor a reflexiós viszonyok nem azonosak, akkor a két színek eltérésébe az abszorpció változása mellett a szórás változása is beleszól, és rendszerint elfedi a kismértékű abszorpció-változásokat. Ez a nehézség az alapvető oka, hogy a rendkívül inhomogén szerkezetű faanyagok különféle behatásokra történő változásának vizsgálatára a diffúz reflexiós spektroszkópia helyett még ma is gyakran a káliumbromid pasztillás módszert alkalmazzák. A szakirodalomban alig találhatók olyan publikációk, melyek az egzakt módon felvett diffúz reflexiós különbségi színek (a kezelt minta Kubelka-Munk színekéről kivonjuk a kezeletlen minta K-M színekét) segítségével mutatnák ki a változásokat.

A felületi érdesség hatását vizsgálta Faix és Böttcher (1992). Többféle szemcseméretű faport keverték össze káliumbromid porral különböző koncentrációk mellett. A minták infravörös színepei között a legnagyobb eltéréseket az 1100 cm^{-1} -es hullámszám környékén találták. A közeli infravörös színekre vonatkozóan Tsuchikawa és munkatársai (1996, 2001) kimutatta, hogy az infravörös színek a rostirányhoz képest különböző anatómiai irányú méréseknél eltér egymástól, és különbségek mutatkoznak a

polarizált és a nem polarizált infravörös sugárzás reflexiójában is. Michell (1991) tapasztalt anomáliákat a diffúz reflexióval felvett infravörös színeképeknél a 950-1200 cm^{-1} tartományban, amit Hembree és Smyrl (1989) kalcium karbonáttal és koffeinnel végzett vizsgálatai alapján, a tükrös reflexió jelenlétével magyarázott. Hasonló megállapításokat tett Pandey és Theagarajan (1997) az 1150-950 cm^{-1} hullámszám tartományra. Zavarin és munkatársai (1990) az 1166 cm^{-1} -nél lévő sáv intenzitásában találtak eltérést a rostokra merőleges és azokkal párhuzamos mérésirány esetén.

Jones és Heitner (1973) vizsgálta a K-M elmélet alkalmazhatóságát tangenciális és radiális metszeteken 456 és 495 nm-es hullámhosszú fénnel. Az eredményekből azt a következtetést vonták le, hogy a radiális metszetenél alkalmazható a K-M elmélet de a tangenciális metszetenél nem, mert nagy eltérések mutatkoztak az egyes mérések között. A véleményünk szerint azért volt nagy az eltérés az egyes tangenciális metszeteken mért abszorpció és fényszórás között, mert a minták eltérő mértékben tartalmaztak korai és késői pásztát (vagy csupán az egyiket). A korai és a késői pásztá reflexiók tulajdonságai viszont jelentősen eltérnek egymástól az eltérő porozitás okán. Tehát az eredmények nagy szórása inkább az eltérő anatómiai tulajdonságokban keresendő, mintsem a K-M elmélet alkalmazhatóságában.

A különböző fényforrásokkal végzett vizsgálatok eredményeinek összehasonlítására a szakirodalomban kevés példa található. Ota és munkatársai (1997) a császárfű (*Paulownia tomentosa*) furnér színtabilitását tesztelték napsugárzás és higanygőzlámpás besugárzás hatására. Felületkezelt faanyagok degradációját vizsgálták Podgorski és munkatársai (1996) szabadtéri kitettségi és mesterséges, laboratóriumi időjárás-imitációval. Arnold és munkatársai (1991) fluoreszcenciás UV lámpával és xenonlámpával történt imitációt hasonlítottak össze. A fénybesugárzási ciklusok között vízpermetezést alkalmaztak. A vizsgálat időtartama 2400 óra volt. Az első méréseket 600 órás kezelés után végezték, és a minták felületerózióját mérték. Megállapították, hogy a két fényforrás hatása nagyon hasonló volt. Véleményünk szerint ilyen hosszú kezelési idővel és a vizes kioldás hozzáadásával csak a nagymértékű eltéréseket lehet kimutatni. A finomabb különbségek feltárásához a rövidebb kezelési idő, vízpermetezés nélkül alkalmasabb lett volna.

A fent említett eredmények tükrében ezen munkában szisztematikusan megvizsgáljuk a felületi érdesség és a mérőgeometria – anatómiai irány hatását a mérési eredményekre. Javaslatot teszünk a K-M elmélet használhatóságainak korlátaira is. Kutatási feladatként tűztük ki azon kísérleti körülmények feltárását, melyek segítségével a fényszórás hatása

minimalizálható. Az így nyert kísérleti tapasztalatok birtokában célul tűztük ki az ultraibolya fénynek a fát károsító hatásának vizsgálatát, pontosabban az ez ideig a szakirodalomban fellelhető eredmények pontosítását, és még fel nem tárt további jelenségek megfigyelését. A kísérleti lehetőségek korlátai mellett összehasonlítottuk a napsugárzás és a mesterséges fényforrások által okozott fotodegradációt.

A fent említett probléma vizsgálata azért időszerű napjainkban, mert a Napnak a földfelszínt érő ultraibolya sugárzása a Föld ózonrétegének vékonyodása miatt erősödik. Az esztétikus, környezetbe illő építkezés viszont egyre inkább alkalmazza a faanyagot az épületek kültéri, funkcionális és díszítő elemként egyaránt. Csak az ultraibolya fotodegradáció mechanizmusának megértése után van reményünk arra, hogy a sugárzásnak kitett faanyagokat hatásos védelemben részesítsük.

3. A vizsgált faanyagok és a vizsgálati módszerek

3.1. Gőzölési vizsgálatok

A színváltoztatás és a színhomogenizálás vizsgálata érdekében az alábbi fafajokon végeztünk gőzölést: akác (*Robinia pseudoacacia* L.), bükk (*Fagus silvatica* L.), gyertyán (*Carpinus betulus* L.) és csertölgy (*Quercus cerris* L.). A vizsgálatokat a NyME Fizika, Faanyagtudományi és Kémiai Intézetében végeztük.

Akác faanyagon a laboratóriumi gőzölési kísérleteket 75-100°C között exsikkátorban végeztük. Az edényben a faanyag alatt desztillált vizet helyeztünk el. Ez a víz biztosította a zárt gőzölő térben a telített vízgőzt. Az exsikkátorokat szárítószekrénybe tettük. A szekrény hőmérsékletét az automatika a beállított hőmérséklet körül $\pm 0,5^\circ\text{C}$ tartományban tartotta. A gőzöléshez nedves akác faanyagot használtunk, a nedvességtartalom 25-30% között volt. (A dolgozatban a rosttelítettség fölötti nedvességtartalmú faanyagoknál a „nedves”, légszáraz állapotnál a „száraz”, 0 %-os nedvességtartalom közelében pedig az „abszolút száraz” jelzőket használjuk.) A mintákat 1; 2; 4; 6; 9; 12; 15; 18; 22 napos gőzölés után szedtük ki a gőzölőtérből. A 105-115°C közötti hőmérsékleteken exsikkátor helyett nyomásálló edényt alkalmaztunk. Ezeken a hőmérsékleteken a gőzölést 6 napig folytattuk (120°C-on 2,5 napig, 130°C-on 2 napig), mert ezt követően már nem történt érdemi színváltozás. A 120-130°C-os hőmérsékleteket az 1. képen (A képeket a dolgozat melléklete tartalmazza.) látható átalakított autoklávban állítottuk elő. A grafikonok egy részén kinagyítottuk a 6 napig tartó színváltozást, mivel eddig megtörténik a színváltozások jelentős része és a faipari gyakorlatban a költségek miatt sem érdemes 6 napnál tovább gőzölni. Gőzöltünk száraz (12% körüli nedvességtartalmú) akác faanyagot is, hogy kimutassuk a színváltozás függését a faanyag induló nedvességtartalmától. Ilyen vizsgálatokat korábban nem végeztek.

A próbatestek méretét a gőzölő edény mérete szabta meg. A keresztmetszetük 25x25 (mm) volt, a hosszuk pedig 100- 300 mm között változott. Sarj és mag eredetű faanyagon egyaránt végeztünk vizsgálatokat. A gőzölés kezdetekor 6 órás felfűtést biztosítottunk. A gőzölési időt a beállított hőmérséklet elérésétől számítottuk. Gőzölés után a próbatesteket a laboratóriumi légtérben egy hónapig kondicionáltuk. A légszáraz próbatesteket hosszirányban, középen kettévágtuk, és a frissen kialakított felszínen végeztük el a színmérést.

A színméréshez egy számítógéppel vezérelt MINOLTA 2002 típusú színmérő készüléket használtunk. A színpontokat a háromdimenziós CIELAB színingermérő rendszerben adtuk meg. Ebben a rendszerben a minta világosságát az L^* koordináta adja meg. Faanyag esetében az a^* koordináta a vörös színezetet, a b^* koordináta a sárga színezetet reprezentálja. (A nagyobb értékek az élénk színeket, a kisebbek a szürke árnyalatokat adják.)

A bükk faanyag gőzölési vizsgálatainak egyik részét 80 és 110°C közötti hőmérsékleteken végeztük el nedves állapotú (45% átlagos nedvességtartalmú) faanyagon. A mintákat olyan pallókból vágtuk ki, melyek álgesztet (színes geszt) és fehér faanyagot egyaránt tartalmaztak. A mintakészítésnél ügyeltünk arra, hogy mindegyik tartalmazzon fehér és színes faanyagot is. A száraz kiinduló állapot esetén a próbatestek nedvességtartalma 10-15% között volt. A gőzölés és a színmérés az akácgőzölésnél leírtak szerint történt, azzal az eltéréssel, hogy a fehér és a színes gesztet egyaránt tartalmazó próbatestek mérete 25x70x200 (mm) volt.

Gyertyán faanyagon a gőzölési vizsgálatokat nedves állapotú (57%-os átlagos nedvességtartalmú) faanyagon végeztük el. Egy-egy sorozat próbatestjeit egyazon pallókból vágtuk ki. A vizsgálatokhoz 25x25x200 (mm) méretű próbatesteket alakítottunk ki. A minták a gőzölés előtti színük tekintetében kis mértékben inhomogének voltak. (Ez okozza a görbék hullámlását.) A gőzölő edénybe a gyertyán faanyag alá nedves bükk, száraz bükk illetve száraz akác faanyagot tettünk. Mivel a bükk faanyagtól vártuk a legjelentősebb elszínezést, ezért azt négy különböző gyertyán/bükk arányban (0,16; 0,32; 0,48; 0,64) tettük a gyertyán faanyag mellé. Ipari méreteken, ahol a berakott faanyag majdnem teljes egészében kitölti a gőzölőteret, ez az arány várhatóan tovább csökkenthető. Esetünkben a legkisebb aránynál a bükk faanyag a gőzölőternek csupán az egy ezrelékét foglalta el, ezért az arányt tovább nem láttuk célszerűnek csökkenteni. Az egyik sorozat csak gyertyán faanyagot tartalmazott. A gőzölést 85 és 95°C hőmérsékleteken végeztük el. A gőzölés és a színmérés az akácgőzölésnél leírtak szerint történt.

A csörgőzölési vizsgálatokat 80 és 110°C közötti hőmérsékleteken végeztük el nedves állapotú (55% nedvességtartalmú) faanyagon. A mintákat olyan pallókból vágtuk ki, melyek álgesztet (színes geszt) és fehér szíjácsot egyaránt tartalmaztak. A mintakészítésnél ügyeltünk arra, hogy mindegyik tartalmazzon fehér és színes faanyagot is. A gőzölés és a színmérés az akácgőzölésnél leírtak szerint történt, azzal az eltéréssel,

hogy a fehér és a színes faanyagot egyaránt tartalmazó próbatestek mérete 20x70x200 (mm) volt.

A gőzölt akác faanyag időjárás-állóságának vizsgálatánál gyalult felületű natúr akác és gőzölt akác próbatesteket helyeztünk el a szabadban, Sopronban az egyetem területén. A próbatestek vizsgált felülete dél felé nézett, és 30°-os szöget zártak be a függőlegessel. Kontrollként az akác minták mellé tölgy mintákat is tettünk. A próbatestek mérete 1200x100x20 (mm) volt. A vizsgálat 1997. augusztusában kezdődött és két évig tartott. Az első évben havonta, a második évben kéthavonta végeztünk színmérést.

A vízgőz szerepének feltárásához a vizsgálatokat laboratóriumi körülmények között száraz állapotra kondicionált akác (*Robinia pseudoacacia* L.), erdeifenyő (*Pinus sylvestris* L.), lucfenyő (*Picea abies* Karst), olasznyár (*Populus euramericana* I-214) és vörösfenyő (*Larix decidua* L.) fafajokkal végeztük el. A próbatestek méretét az infravörös spektrofotométer mintatartójának befogadó képessége szabta meg. Homogén, a felszínén csak korai pásztát tartalmazó, 12 mm átmérőjű és 1,5 mm vastag korongokat vágunk ki a faanyagokból. A minták felületét 800-as csiszolópapírral csiszoltuk meg. A minták felületén maradt kvarc szemcséket sztereómikroszkóp alatt távolítottuk el. A próbatesteket exsikkátorba helyezve vetettük alá a kezeléseknél. Az egyik exsikkátorban foszforpentoxid a másikban desztillált víz volt a minták alatt, hogy abszolút száraz illetve nedves klímát kondicionáljanak. Az exsikkátorokat a kezeléseket elvégzése céljából 90°C-ra beállított szárítószekrénybe tettük. A kezelést 1, 2, 4, 5, 7, 10, 13, 18, 26, 31, 36 nap után megszakítottuk, hogy megmérjük a minták színét és az infravörös színeküket. A nedves klímában lévő mintákat a mérések előtt egy napig vákuumszáritóban szárítottuk. A mintákat a kezeléseket és a mérések között foszforpentoxid fölött, exsikkátorban, laboratóriumi hőmérsékleten és teljes sötétségben tároltuk. A színmérést egy számítógép vezérelt Elrepho-2000 típusú színmérő készülékkel végeztük el. Az eredményeket a CIELAB színekoordináta rendszerben adtuk meg.

Mivel a faanyagok a fényt nagyon intenzíven elnyelik, a közvetlen átvilágításuk az abszorpciós színek felvételéhez nem lehetséges. A mai technikai háttér mellett az egyik leggyakrabban alkalmazott módszer a diffúz reflexió mérésén alapul. Elméleti háttérét a Kubelka-Munk (K-M) elmélet szolgáltatja (Kubelka és Munk 1931, Kubelka 1948), melynek segítségével az abszorpciós koefficiens (k) és a szórási koefficiens (s) hányadosa határozható meg az alábbiak szerint:

$$\frac{k}{s} = \frac{(1 - R_{\infty})^2}{2R_{\infty}}$$

Ahol R_{∞} a diffúz módon reflektált fény számára végtelennek tekinthető vastagságú (már semennyi fény sem jut át rajta) réteg által visszavert fény színeképe. Mivel a fényszórás alig függ a hullámhossztól, ezért a K-M összefüggés grafikonja az abszorpciós színeképpel azonos lefutásúnak tekinthető. Ha a színekép változását vizsgáljuk (az itt közreadott vizsgálatoknál ezt tesszük), akkor közömbös, hogy a K-M függvény mennyire pontosan adja vissza az abszorpciós színeképet. Értékeit K-M egységekben szokás megadni a hullámszám függvényében. Azokban az esetekben, ahol a K-M függvényt egy adott hullámszámnál egységnyire normáltuk, ott a kapott színeképet relatív egységekben adtuk meg. A színeképeket az infravörös, $400\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$ hullámszám tartományban vettük fel.

Az infravörös (IR) színeképeket egy FTS-40-es Bio-Rad Digilab FTIR spektrofotométerrel detektáltuk, mely fel volt szerelve egy Spectratech gyártmányú diffúz reflexiós feltétellel. A színeképeket 64 mérés átlagából, 4 cm^{-1} felbontással készítette el a készülék számítógépe. A háttér színeképet egy alumínium lapka segítségével vettük fel. A színeképeken 3800 , 1900 , és 850 cm^{-1} helyeken végeztünk alapvonal korrekciót, majd a színeképeket a 1352 cm^{-1} és 1406 cm^{-1} közötti csúcsnál egységnyire normáltuk. A változások demonstrálására különbségi színeképeket képeztünk úgy, hogy a kezelt minta színeképéből kivontuk a kezeletlen minta színeképét. Mivel a diffúz reflexiós technika nagyon érzékeny a mérendő felület érdességére, ezért a mintákat mindig úgy helyeztük el a mintatartóban, hogy az IR sugár haladási iránya párhuzamos legyen a minta rostirányával.

3.2. Fotodegradációs vizsgálatok

A vizsgálatokba a fafajok széles skáláját vontuk be. Az alábbi fafajok anyagát tettük ki mesterséges illetve természetes fényhatásnak: akác (*Robinia pseudoacacia* L.), bükk (*Fagus crenata*) és (*Fagus sylvatica* L.), duglászfenyő (*Pseudotsuga mensiezii*), erdeifenyő (*Pinus sylvestris* L.), ezüstjuhar (*Acer saccharinum*), feketefenyő (*Pinus nigra*), japán ciprus (*Cryptomeria japonica* D. Don), álciprus (*Chamaecyparis obtusa* Seib. et Zucc.), jegenyefenyő (*Abies alba* Mill), kőris (*Fraxinus excelsior*), lucfenyő (*Picea abies* Karst), nyár (*Populus euramericana* I-214) és (*Populus caulesceus*), tölgy (*Quercus crispula*), vörösfenyő (*Larix decidua* L.), gyertyánszil (*Zelkova serrata*).

Ezenkívül vizsgáltuk a fűfélékhez tartozó bambusz (*Phyllostachys pubescens*) viselkedését is. A próbatestek méretét az infravörös spektrofotométerek mintatartójának befogadó képessége szabta meg. Homogén, a felszínén csak egyféle pásztát tartalmazó, 12 mm átmérőjű és 1,5 mm vastag korongokat vágunk ki a faanyagokból, illetve 50x10x2 (mm) méretű lapkákat készítettünk. Gyalult, 800-as, 600-as és 120-as csiszolópapírral érdesített, valamint mikrotommal metszett mintafelületet egyaránt készítettünk.

A próbatestek besugárzását döntő mértékben ultraibolya fénnel végeztük. Az alább felsorolt fényforrásokat használtuk. Egy XENOTEST 150S típusú öregítő szekrény melynél a sugárforrás fényteljesítmény-sűrűsége a behelyezett minták síkjában 1250 W/m^2 volt (szűrő nélkül). A minták egy ultraibolya szűrő mögött foglaltak helyet. Tekintetbe véve a lámpa emissziós színeképét és a szűrő áteresztő képességét, a mintákat 300 nm és 380 nm közötti hullámhosszú ultraibolya fény érte. A minták felszíni hőmérséklete a kezelés során 40°C körüli érték volt, melyet termoelemmel mértünk, rögtön a sugárforrás kikapcsolása után. Szintén xenon lámpával működött az SX-75: Suga Test Instrument is, melynek az emissziója a 300-400 nm tartományban 180 W/m^2 volt. Itt nem volt lehetőség a látható fénytartomány kiszűrésére. A kamrában mért „fekete panel” hőmérséklet 63°C volt, és a relatív páratartalmat 50%-ra állítottuk be. Alkalmaztunk higanygőz lámpákat is. Az egyik 300 W elektromos teljesítményű volt, emissziós színeképét a 2. kép szemlélteti. A besugárzandó próbatestek a lámpától 20 centiméterre helyezkedtek el a laboratórium légterében. A másik esetben a HAL 800NL típusú lámpa egy a Nippon Denchi Co. Ltd. által gyártott, KBP 659 típusú kamrában helyezkedett el, melyet ipari méretű faszerkezetek besugárzására terveztek. A higanygőz lámpa fényteljesítménye 320 W volt, és a próbatestek 64 centiméterre helyezkedtek el tőle. A hűtött kamrában az áramló levegő hőmérséklete 26°C volt.

A fent jellemzett fényforrások esetében csak a gyártók által megadott emissziós adatokra támaszkodhattunk. Ezek viszont nem tették lehetővé az általuk kibocsátott ultraibolya fény intenzitásának és hullámhossz összetételének az összehasonlítását. Ezért ultraibolya fényt kibocsátó lézereket is használtunk sugárforrásként. A lézerek alkalmazásának nagy előnye, hogy csak egy jól definiált hullámhosszon sugároznak, és az intenzitásuk pontosan mérhető. Az alkalmazott lézerek adatait az 1. táblázat tartalmazza.

1. táblázat Az alkalmazott lézerek adatai

Lézer típusa	Hullámhossz (nm)	Impulzus energia (mJoule)	Impulzus idő (ns)	Impulzus frekvencia (Hz)	Σ Energia (Joule)	Teljesítmény sűrűség (W/m^2)
ArF	193	10	20	10	15	$4.4 \cdot 10^9$
KrF	248,5	20	15	10	100	$1.2 \cdot 10^{10}$
XeCl	308	20	20	10	100	$8.8 \cdot 10^9$
Nitrogén	337	2,8	15	30	100	$1.6 \cdot 10^9$
Rodamin	581	4	15	10	100	$2.4 \cdot 10^9$

A nagy teljesítmény-sűrűségű lézersugár nem alkalmas közvetlenül a faanyag besugárzására, mivel nagyon kis felületre koncentrálódik és képes a felület elpárologtatására. Ezért a lézersugarat szórólencsével széttartóvá tettük. A mintának a lencsétől való távolításával tudtuk csökkenteni és beállítani a felületi teljesítmény-sűrűséget, illetve az impulzusenergiát. Az 1. táblázatban szereplő „ Σ Energia” a kezelés során a minta felületére jutó összes energiát jelöli.

A napsugárzásnak kitett mintákkal is végeztünk vizsgálatokat. A próbatesteket Takayamában (Japán, földrajzi szélesség: $39^\circ 9,3$ perc, tengerszint feletti magasság: 560 méter) helyeztük a szabadba. Az egyik sorozatot a magas páratartalmú kora nyári időszakban (2003. május 5. és augusztus 19. között, max. relatív páratartalom: 80%, és a hőmérséklet $16-41^\circ\text{C}$ között változott) helyeztük ki. A másik sorozatra ezek az adatok: 2003. szeptember 17-december 5., 71%, $5-38^\circ\text{C}$ voltak. A minták csak napsütéses időben voltak kitéve a tartóállványra, mely dél felé nézett és a vízszintessel 30° -os szöget zárt be. A besugárzások között a mintákat a laboratóriumban, teljes sötétségben tároltuk. Az első sorozat esetében a minták 200 órás, a másodikban 120 órás besugárzást kaptak.

Fénybesugárzásra a faanyagban történt változásokat színméréssel és az IR színekép felvételével detektáltuk. A 3.1 fejezetben leírt színmérő készülékek mellett még a Nippon Denshoku Industries által gyártott SE-2000 típusú készüléket használtuk. Az IR színeképek felvételére az alábbi spektrofotométereket alkalmaztuk: Perkin-Elmer 1710 ; FTS-40-es, Bio-Rad Digilab FTIR; FTS-65A-s, Bio-Rad Digilab FTIR és a kétsugaras JASCO: DR-81 FTIR. Az IR színeképek felvétele a gőzölésnél leírtak alapján történt, azzal a különbséggel, hogy nem minden esetben volt szükség 3 pontos alapvonal korrekcióra. A színeképeket az összehasonlítás érdekében az 1380 cm^{-1} körüli

maximumnál egységnyire normáltuk. Ezt a cellulóz C-H csoportjához tartozó sávot gyakran használják, mint belső vonatkoztatási sáv, mert centrális helyzetű, kellően intenzív és a tapasztalatok szerint stabil a fénybesugárzással szemben.

A különbségi színeképek korrekt meghatározásához szükséges vizsgálati körülmények feltárását és alkalmazását sikerrel oldottuk meg. Korábban ilyen, a változásokat kiválóan mutató különbségi színeképeket a szakirodalomban még nem közöltek. E módszer segítségével sikerült gazdagítani a faanyagok fotodegradációjával kapcsolatos ismereteket.

4. A vizsgálatok eredményei

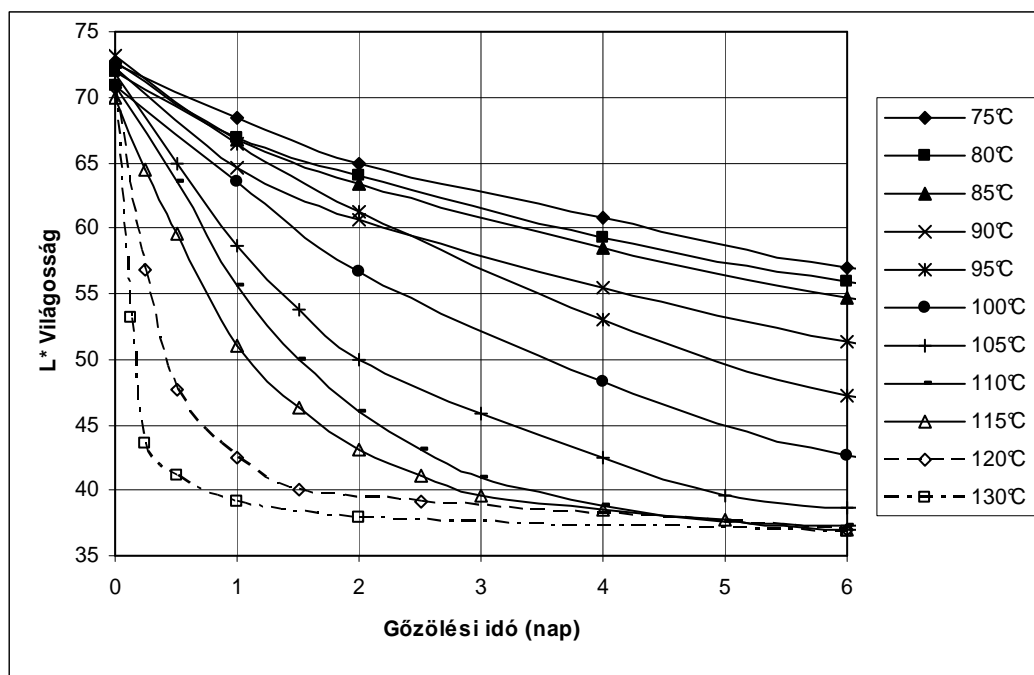
4.1. Gőzölési vizsgálatok

4.1.1. Akácgőzölés

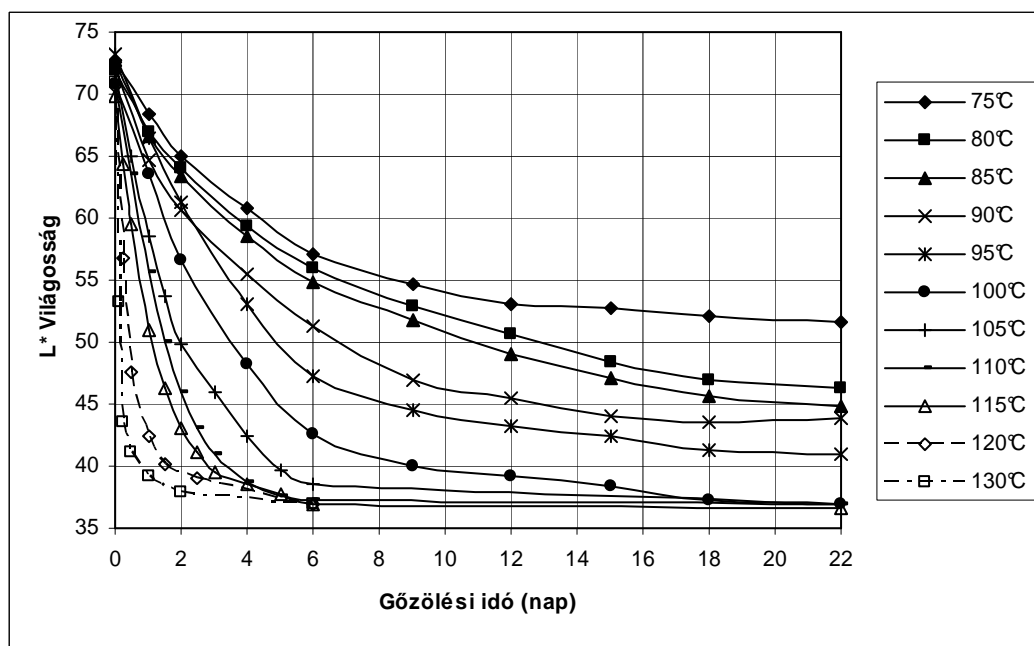
Az akác faanyag színe esztétikai szempontból jelentősen eltér a faanyagok többségétől. Hiányzik belőle a barnás árnyalat mely a faanyag kellemes, meleg színárnyalatát adja. Helyette egy zöldessárga árnyalat dominál. Ez az esztétikai szempontból kedvezőtlen színárnyalat jelentősen korlátozza az egyéb tulajdonságai alapján értékes akác faanyag felhasználását. Gőzöléssel ez a zöldessárga színárnyalat jelentősen csökkenthető, és növelhető a barna árnyalat. Szabad szemmel is jól érzékelhető, hogy gőzölés hatására a faanyag világossága jelentősen csökken. Színezete a vörös irányában tolódik el és veszít sárga tartalmából (3. kép). Az észlelt változásokat az objektív színmérés is megerősíti.

A világosság csökkenését a gőzölési idő és a hőmérséklet függvényében az 1. és a 2. ábra mutatja. (105°C fölött a 22 napos adatok, 120°C fölött a 6 napos adatok nem mért értékek, hanem extrapolálás eredményei az 1-6. ábrán.) Valamennyi hőmérséklet esetében igaz, hogy a minták világossága a gőzölés kezdetekor jelentősen csökkent, majd ez a folyamat lelassult. A hőmérséklet növelésével egyre sötétebb színeket lehetett elérni, és a lényeges változások időtartama rövidebb lett, ezen belül a változás üteme egyre gyorsabb lett. A grafikonok alapján megállapítható, hogy alacsony hőmérsékleten nem érhető el olyan sötét szín, mint magas hőmérsékleten, hiába növeljük a gőzölési időt. A színváltozás lelassulása miatt alacsony hőmérsékleten sem érdemes a gőzölést hat nap után folytatni, 100°C felett ez az idő 2-3 napra (120°C fölött 1 napra) zsugorodik.

Megfigyelhető, hogy a világosság-csökkenés tendenciájában 95°C-nál kismértékű változás következik be. A 95°C alatti gőzölés görbéi közel azonos lefutásúak, és a meredekségük alig változik a gőzölési idő függvényében. Míg 95°C fölött a meredekség lényegesen nagyobb és jelentősen függ a hőmérséklettől. A világosság görbék telítődést mutatnak, ami a 110°C fölötti görbéken már az 1. ábrán is jól látható. Ez a telítődés a többi görbe esetében 6 napon túli gőzölési időkre esik (2. ábra). (A 95°C -nál lévő törés a másik két színkoordináta esetében még erőteljesebben mutatkozik a 3-6. ábrákon.) A telítődési szakasz megjelenése azzal magyarázható, hogy a színváltozásért felelős kémiai változások döntő többsége már végbement az adott hőmérsékleten. Mivel ezek az átalakulások hőmérséklet-függőek, a telítődési szakasz a hőmérséklet növekedésével egyre hamarabb bekövetkezik.

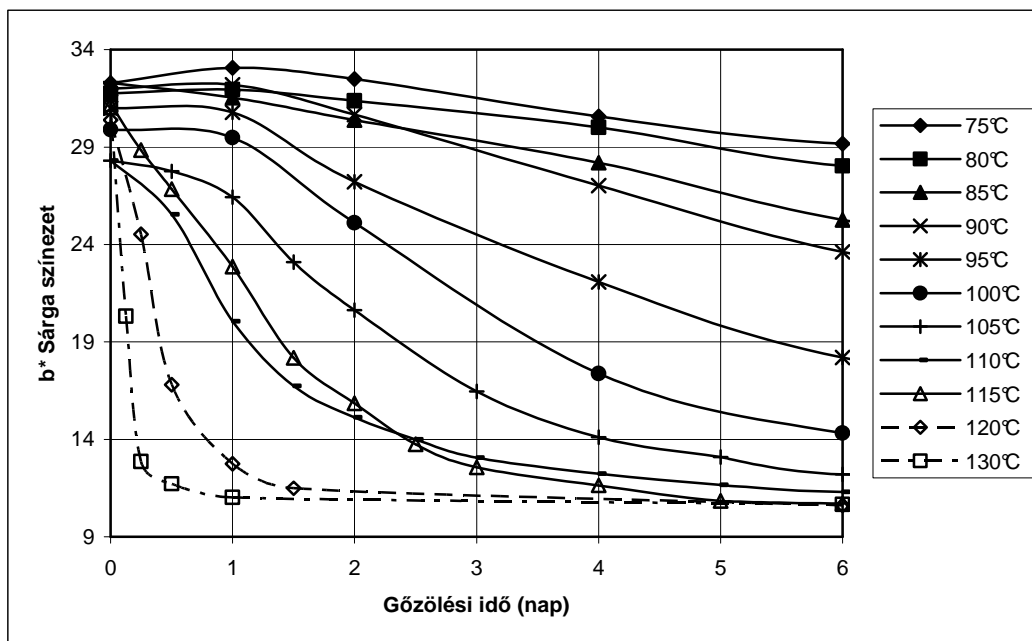


1. ábra A világosság változása a gőzölés első 6 napján a gőzölési idő és hőmérséklet függvényében

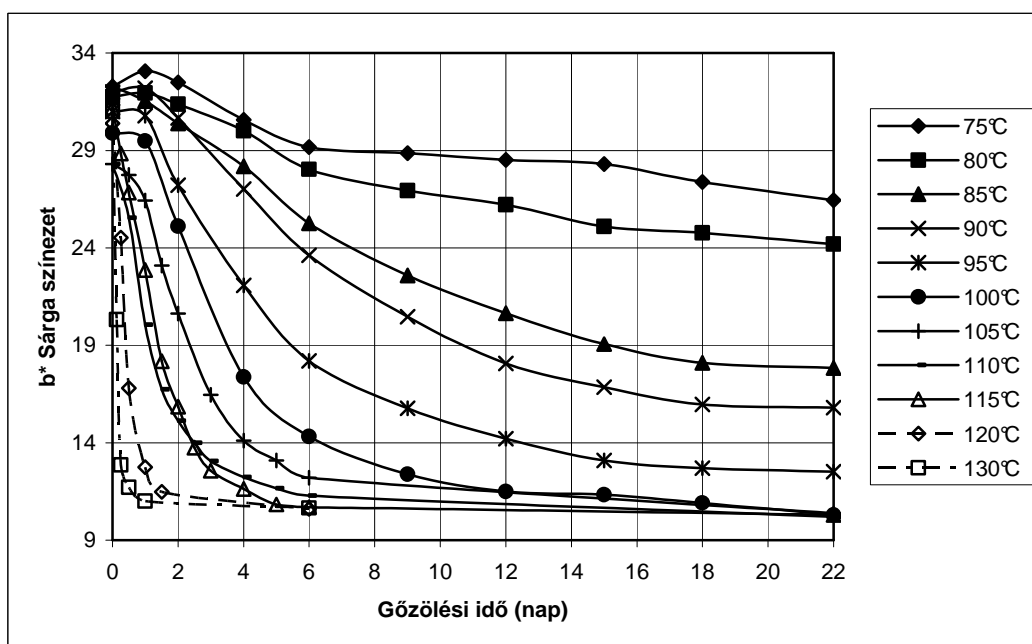


2. ábra A világosság változása a gőzölési idő és hőmérséklet függvényében

A színezet változását a 3-6. ábra szemlélteti. Az akác faanyag színének nem kívánatos sárga színezete (3-4. ábra) 90°C alatti gőzöléskor alig csökken, a magasabb hőmérsékletek viszont már alkalmasak a nemkívánatos sárga szín redukálására. Egészen 105°C-ig nincs változás a sárga színezetben a gőzölés első napján. 110°C fölött viszont



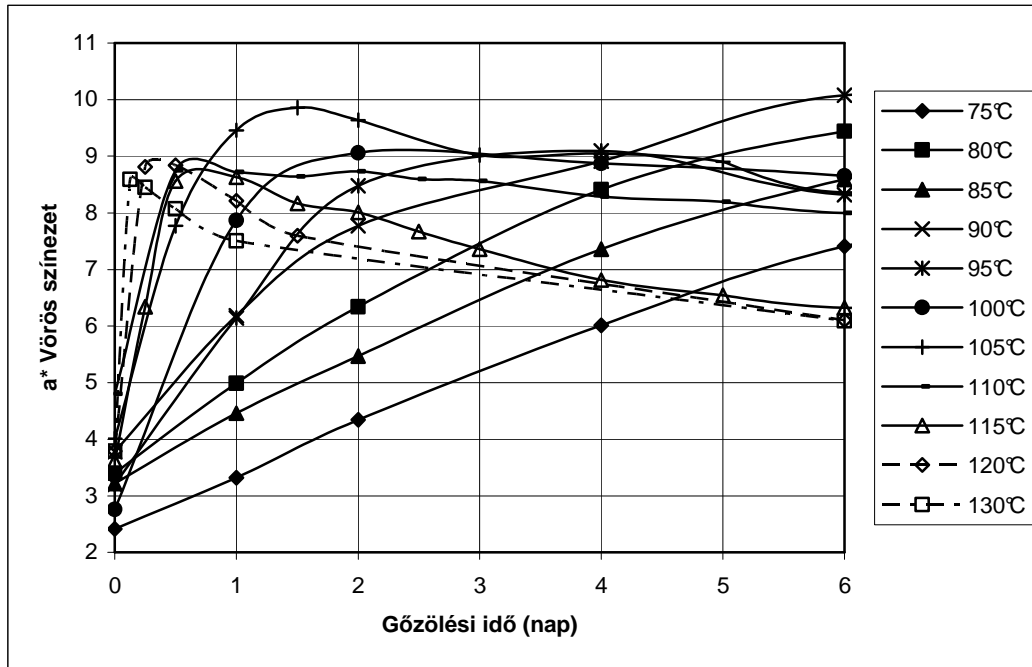
3. ábra A sárga színezet változása a gőzölés első 6 napján a gőzölési idő és hőmérséklet függvényében



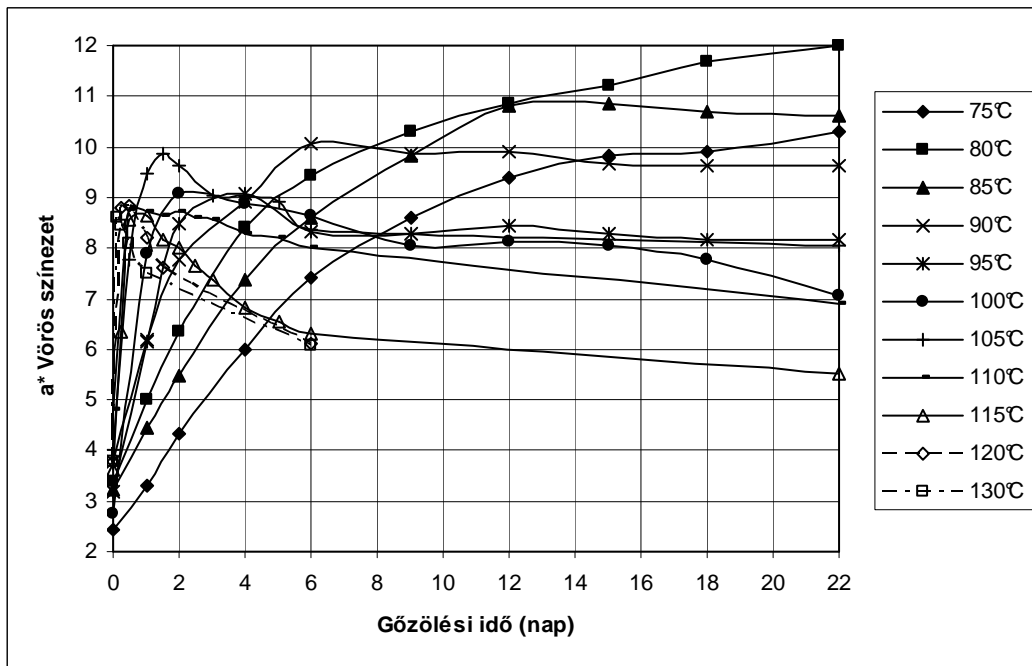
4. ábra A sárga színezet változása a gőzölési idő és hőmérséklet függvényében

azonnal megindul a sárga színezet csökkenése. A változás intenzitása a hőmérséklet emelkedésével növekszik és időben lerövidül. A jelenség hasonló a világosság változásához. Itt is megfigyelhető a lényeges eltérés a 95°C alatti és fölötti változások között.

A vörös színezet (5-6. ábra) a sárga színezettel ellentétesen változik. Itt is kivételt jelentenek a 95°C alatti hőmérsékletek, ezeknél a hőmérsékleteknél a vörös irányú eltolódás a



5. ábra A vörös színezet változása a gőzölés első 6 napján a gőzölési idő és hőmérséklet függvényében



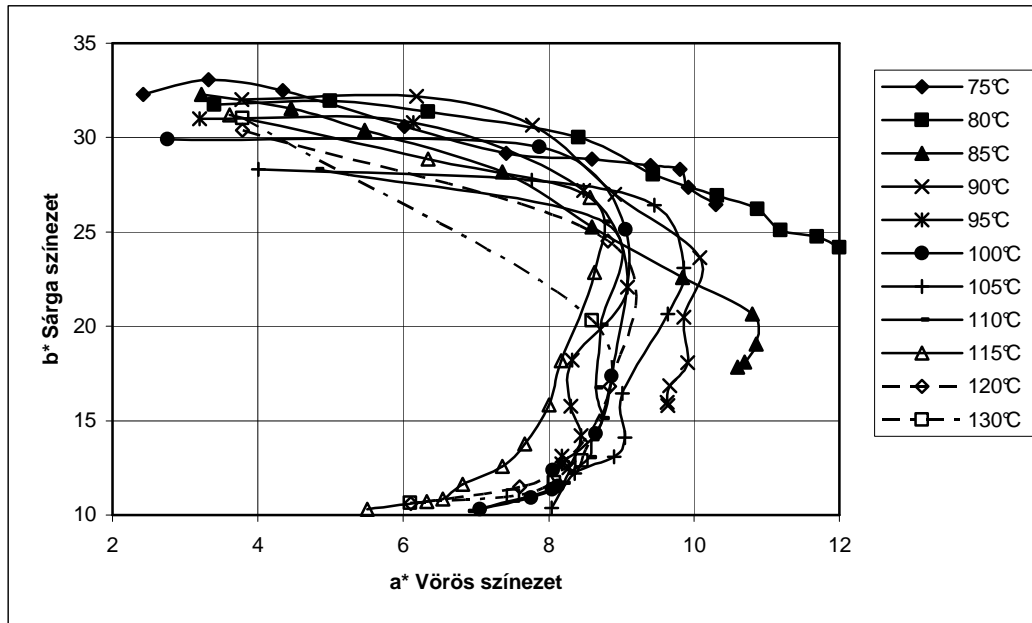
6. ábra A vörös színezet változása a gőzölési idő és hőmérséklet függvényében

vizsgált 22 nap alatt kicsit változó intenzitással folyamatos volt. A jelenségnek gyakorlati jelentősége is van, hiszen magasabb hőmérsékleteken nem érhetők el azok a vöröses árnyalatok, melyek 80°C környékén megvalósulnak. Így például 80°C -on 22 napi gőzöléssel a vörös színezet 12 egységig felvihető. A 95°C fölötti hőmérséklet tartományban a vörös színezet változása az első egy-két napra koncentrálódik, majd megkezdődik a csökkenése. A növekedési szakasz 110°C -on már csak fél nap. A kísérletek azt mutatják, hogy a gőzölés során keletkező, és az elszíneződést okozó, konjugált kettős kötéseket tartalmazó kémiai csoportok nem kötődnek szorosan a faanyaghoz. Ezeket a jelen lévő vízgőz kioldja és megjelennek a kondenzvízben, barnás színűre elszínezve azt. (A dolgozatban kioldódásként nevezett folyamat a valóságban nem egyetlen átalakulás, hanem a járulékos anyagok többlépéses bonyolult változása. Ennek taglalása meghaladja ezen munka kereteit.) A vörös színezet változására tekintettel fontos megállapítani, hogy az optimális gőzölési idő 95°C fölött nagyon erősen függ a hőmérséklettől. E tekintetben a gőzölést a maximum elérése után nem érdemes folytatni. Ha viszont egy sötét árnyalat elérése a cél, akkor a világosság csökkenésére is tekintettel kell lenni a gőzölési idő meghatározásakor. A fentiek alól kivételt képeznek a 95°C alatti hőmérsékletek. Itt az elérni kívánt vörös árnyalathoz a megnövelt gőzölési idővel járó költségnövekedésekre kell tekintettel lenni a gőzölési idő meghatározásakor.

A kísérletek eredményei jól mutatják, hogy amíg a vörös színeltolódás döntő mértékben a gőzölés első napján történik, addig a sárga színezet változása az első napon gyakorlatilag nulla az egészen magas hőmérsékletek kivételével. Ez a kémiai folyamatok összetett jellegére utal.

Az 1-6. ábrák egyenkénti tanulmányozásából az a következtetés vonható le, hogy egy adott szín elérése több hőmérsékleten is megvalósítható, csak a gőzölési időt kell jól megválasztani. Ezt a kérdést a 3 dimenziós színváltozást reprezentáló görbék felrajzolásával lehetne pontosan megválaszolni. Mivel ez egy síklapon nem valósítható meg, meg kell elégednünk a kétdimenziós ábrával, ahol az a^* , b^* értékeknek a síklapra eső vetületeit lehet ábrázolni. A teljes színezetváltozást (a^* és b^* változása) követhetjük nyomon, ha a színpontok vándorlását az a^* - b^* színsíkon ábrázoljuk (7. ábra). Az ábrán a bal felső sarokban találhatók a kezeletlen minták színpontjai, ezek a görbék kezdőpontjai. Ezeket követik az egyre hosszabb idejű gőzölések színpontjai. (Az időbeli sorrend az 1-6. ábrákról leolvasható.) A görbék nagyobbik része patkó alakot formáz. A gőzölési hőmérséklet csökkenésével a patkó alsó (időben későbbi) szára egyre rövidebb lesz, a

vörös irányú eltolódás pedig növekszik. Alacsony hőmérsékleten 95°C alatt a 6 napos gőzölés kevésnek bizonyult a görbék visszafordulásához, de 75 és 80 °C-on még a 22 nap sem volt ehhez elegendő. A görbék futásából megállapítható, hogy egyazon szín előállítása különböző hőmérsékleteken csak 100°C környékén valósítható meg. A lényegesen alacsonyabb vagy magasabb



7. ábra A színpontok vándorlása az a^* - b^* síkon a gőzölési idő és hőmérséklet függvényében
(A görbék bal felső kezdőpontjai a kezeltlen minták színezetét jelölik, a többi ponthoz tartozó növekvő gőzölési időt az 1-6. ábrák mutatják)

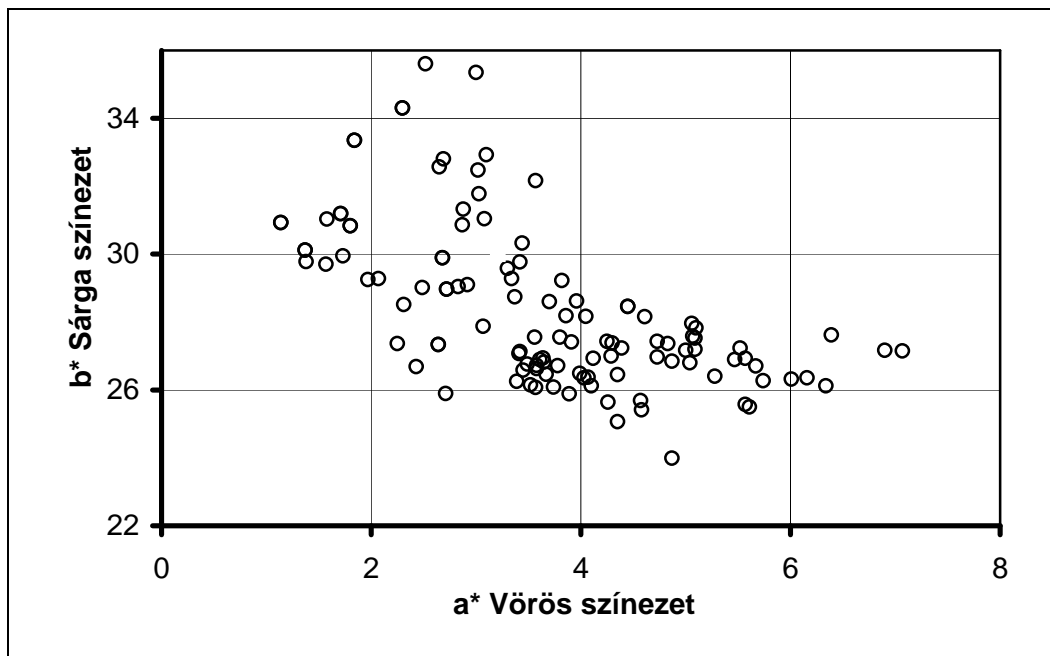
hőmérsékleteken a tendenciák jelentősen eltérnek. Hasonló eredményre jutunk, ha az a^* - L^* koordináta rendszerben ábrázoljuk a színpontokat.

A fent leírt vizsgálatokat elvégeztük mag eredetű és sarj eredetű faanyagokon is. A kétféle származású faanyag viselkedésében nem tapasztaltunk értékelhető különbséget. Eltérés csak annyiban jelentkezett, hogy a juvenilis fa színe a gőzölés után kis mértékben inhomogénebb volt, mint az érett geszté. A sarj eredetű faanyagnál viszont a növekedés első éveiben általában vastagabb évgűrűk voltak találhatóak az általunk vizsgált mintáknál. Ezért a juvenilis fát is tartalmazó mintasorozatok némelyikének színe (nem szignifikánsan) inhomogénebb volt sarjeredetű faanyagnál, mint a mageredetűnél.

Az akác faanyagnak a színbeli tarkasága nem harmonikus, amint ez a faanyagok többségénél fontos jellemző. Hiszen a faanyagok esztétikai értékét éppen a harmonikus színbeli tarkaság, a csodálatos rajzolat adja. Az akác faanyag színe természetes

állapotban a zöldessárgától a szürkéssárgáig terjed, de előfordulnak sárgásbarna rajzolatok is. A színárnyalatok a minták között, és egy mintán belül is nagyon változatos képet mutatnak. Az egymás mellett lévő pászták között a szemünk számára esetenként zavaróan nagy az eltérés. Ezt a színbeli inhomogenitást jól szemlélteti a 8. ábra, ahol a kezeletlen akác faanyag általunk mért, színpontjainak széles variációját láthatjuk. A pontok nagy színezet tartományt fednek le. Jól látható, hogy az akác faanyag színe sokkal inkább sárga, mint vörös. A zöldessárga árnyalatok színpontjai az ábra bal oldalán találhatók, melyeknek alig van vörös színezetük (a^* kicsi). A sárgásbarna, „vaseres” árnyalatok viszont az ábra jobb oldalán találhatók. A sárga színezet szóródása jelentős (24-35 között vannak a pontok), hasonlóan nagy a vörös színezet szóródása is (1-7 között). Ezek az alpmérések is igazolják az akác faanyag nagyfokú tarkaságát. A gőzölés hatására ez a tarkaság megváltozik.

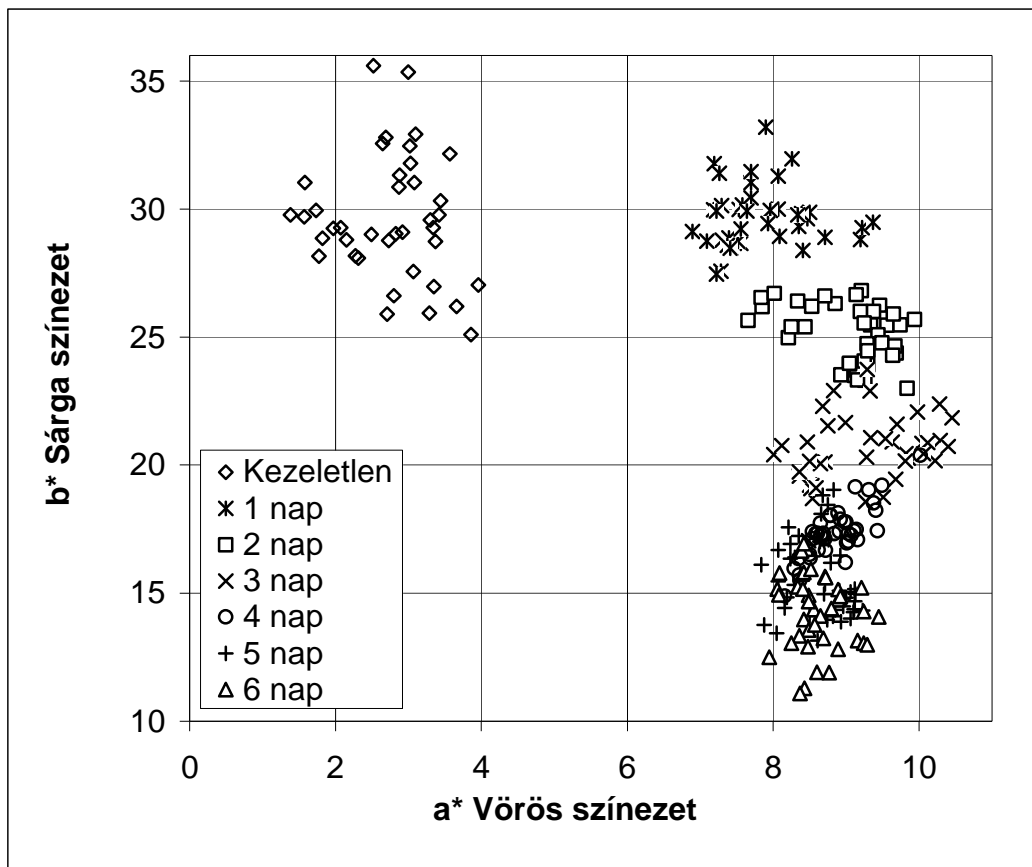
Szabad szemmel is jól érzékelhető, hogy gőzölés hatására a faanyag világossága jelentősen csökken. Színezete a vörös irányában tolódik el, és sokat veszít sárga színezetéből. Ezt igazolják az objektív mérések is (1-6. ábra) Az eredetileg barnás árnyalatú területek színe viszont csak kis mértékben változik. Ezért a két szélső tartomány közötti nagy eltérés jelentősen csökken. Ez a két különböző sebességű színváltozás eredményezi a színhomogenizálást. A kísérletek során valamennyi vizsgált



8. ábra A nem válogatott natúr akác faanyag színpontjainak elhelyezkedése az a^* - b^* síkon

hőmérsékleten tapasztaltunk színhomogenizálást. Magasabb hőmérsékleten a gőzölés egyöntetűbb színt eredményezett, de itt már a különböző pászták által alkotott rajzolat is kezdett elmosódni.

A szabad szemmel észlelt változásokat az objektív színmérés is megerősítette. A 9. ábra egy mintasorozat 100°C-on történő, 6 napig tartó gőzölésének színezet-változását mutatja. Jól látható, hogy az inhomogenitás miatt a kezeletlen minták színpontjai nagy területen szóródnak szét. Az a^* és b^* értékek viszonylag széles tartományt fednek le. A vörös irányú színeltolódás az első nap során jelentős. A gőzölés további napjain alig történik további vörös irányú változás. Az első nap során viszont a sárga színezet nem változik, majd a továbbiakban

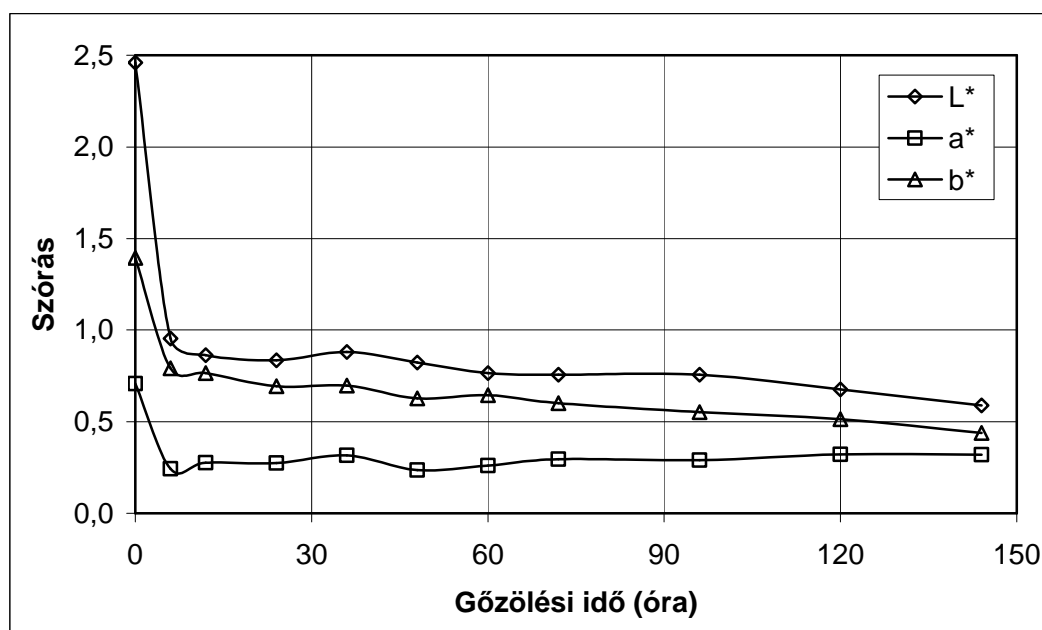


9. ábra A 100°C-on történő gőzölés színhomogenizáló hatásának bemutatása a színpontok által elfoglalt terület szemléltetésével

folyamatos csökkenés figyelhető meg a 4. napig. A színpontok által elfoglalt terület a gőzölés során csökken, ami a színbeli homogenizálódást mutatja. Az a^* tartománya kis mértékben, a b^* tartománya viszont jelentősen csökken. Megállapítható, hogy már a rövid idejű gőzölés is jelentős színhomogenizálást eredményez. Az is jól látszik, hogy

ezen a hőmérsékleten 4 nap után már nincs lényeges színezet-változás, tehát a gőzölést nem érdemes folytatni.

Mindhárom színkoordináta értékeinek szórását (az inhomogenitás jellemzője) a 10. ábra szemlélteti, 120°-on gőzölt akác esetében. A grafikon adataiból kitűnik, hogy már a gőzölés első 6 órájában jelentős szórás-csökkenés történt mindhárom koordináta esetében, és a világosságbeli homogenizálódás volt a legjelentősebb. A gőzölés további részében szisztematikus változás nem történt. A három színkoordináta szórásainak értékei a 6 nap alatt közel kerültek egymáshoz.

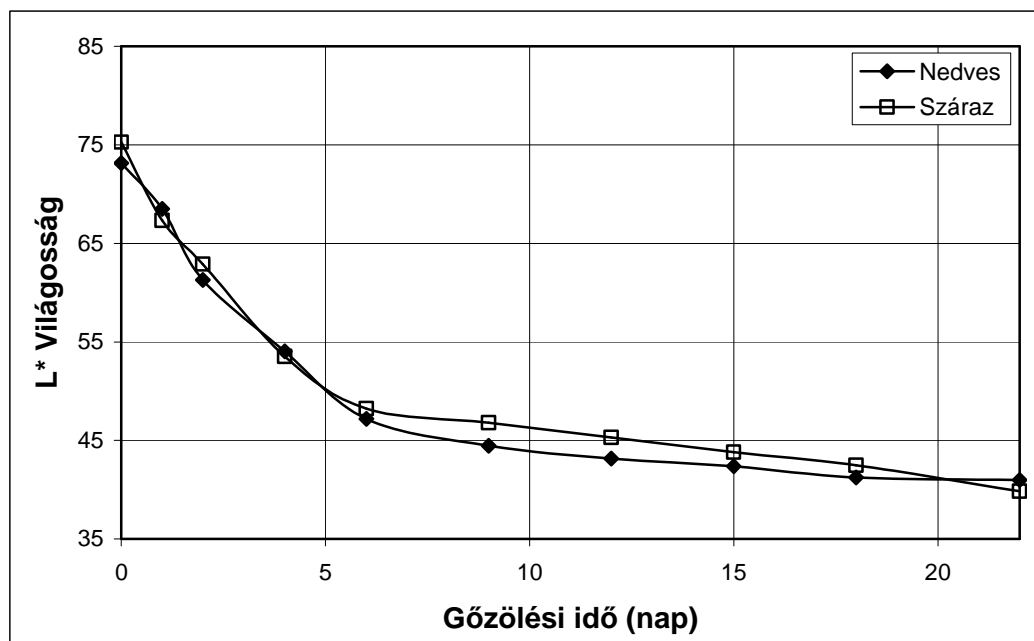


10. ábra A színkoordináták szórásának változása a gőzölési idő függvényében, 120°C-on gőzölt akác esetében.

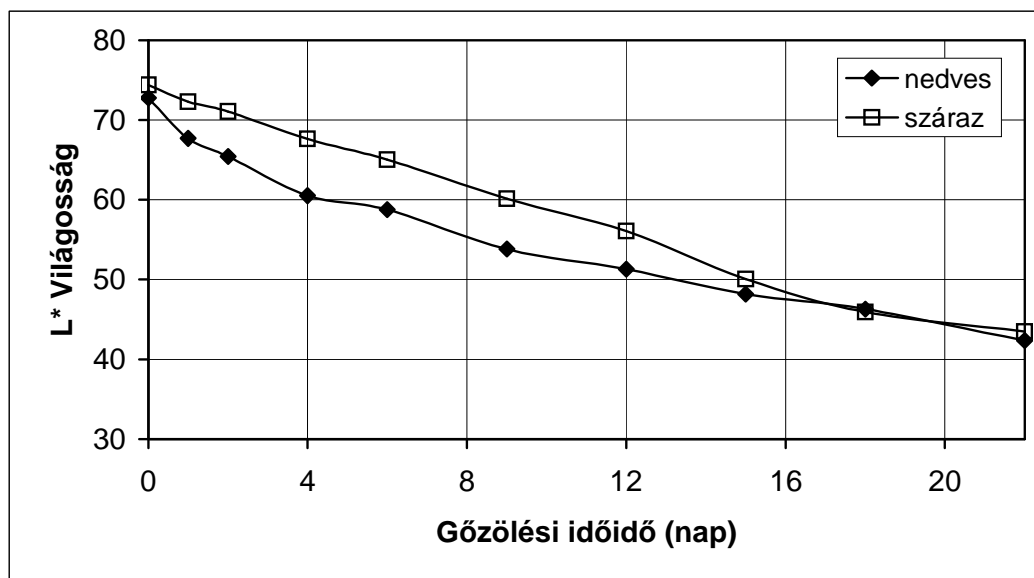
Összegzőképpen megállapíthatjuk, hogy a gőzölés alkalmas az akác faanyag színbeli inhomogenitásának a csökkentésére. Valamennyi vizsgált hőmérsékleten történik színhomogenizálás, mely már a gőzölés kezdeti szakaszában megtörténik. A három színkoordináta közül a világosság szórásának csökkenése a legjelentősebb, ezt követi a sárga színezet szórásának csökkenése. A homogenizáció a vörös színezet esetében kicsi, de ezen koordináta értékei akác esetében kicsiny értékek.

A hagyományos gőzölési gyakorlat azt tartja, hogy eredményesen csak nedves faanyagot lehet gőzölni. Ezzel szemben a laboratóriumi mérések azt mutatják, hogy 95°C fölött a légszáraz akác faanyag éppen olyan jól gőzölhető, mint a nagy nedvességtartalmú. A jelenséget jól szemlélteti a 11. ábra, ahol a száraz (12%) és a nedves (28%) faanyag világosságának változását mutatjuk be 95°C-os gőzölés esetében. A két görbe magasabb

hőmérsékletek esetén is azonos lefutású. A 95°C-nál alacsonyabb hőmérsékleteken eleinte a száraz anyag világossága lassabban csökken, mint a nedvesé, majd behozza a lemaradását, és a két görbe együtt fut (12. ábra). A találkozás a hőmérséklet növelésével egyre közelebb kerül a gőzölés kezdetéhez.



11. ábra A világosság változása 95°C-os gőzölésnél a gőzölési idő függvényében száraz (12%) és nedves (28%) akác faanyag esetében



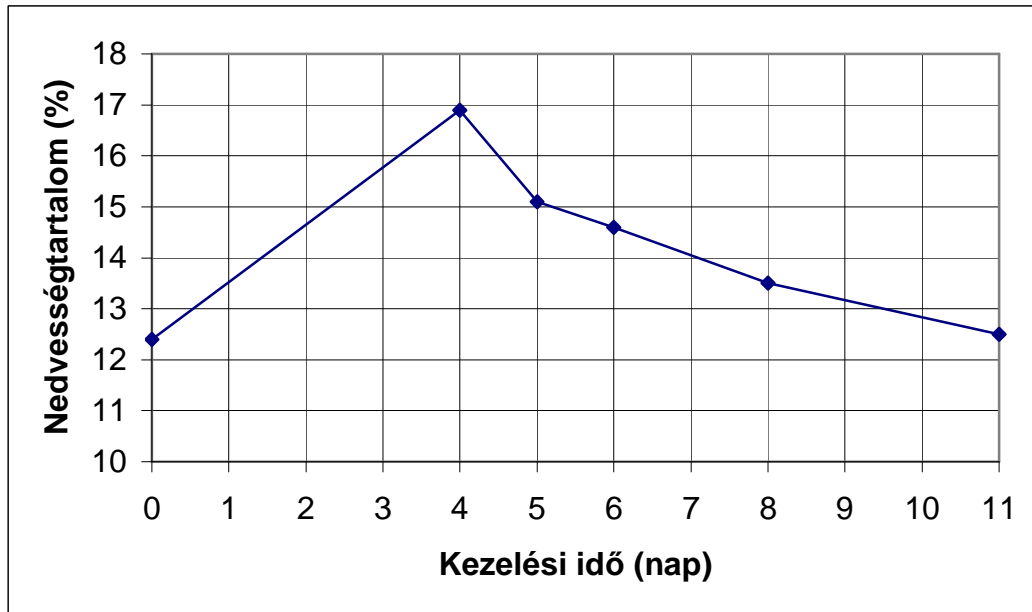
12. ábra A világosság változása 85°C-os gőzölésnél a gőzölési idő függvényében száraz (12%) és nedves (28%) akác faanyag esetében

A 4. kép a száraz állapotban gőzölt faanyagok egy sorozatát mutatja. A színes nyomtatás torzításai ellenére jól láthatók a színárnyalatok eltérései, melyeket a grafikonok objektíven mutatnak be. Említésre méltó az a tapasztalat, hogy rövid gőzölési időknél még megmarad a juvenilis fa és az érett geszt között fellelhető színbeli eltérés. Szerencsére a gőzölési idő növelésével ez az eltérés a többivel együtt homogenizálódik. Ezt jól szemléltetik a sorozatok utolsó darabjai. A színhomogenizálás lehet az egyik meghatározó szempont a gőzölési idő megállapításához.

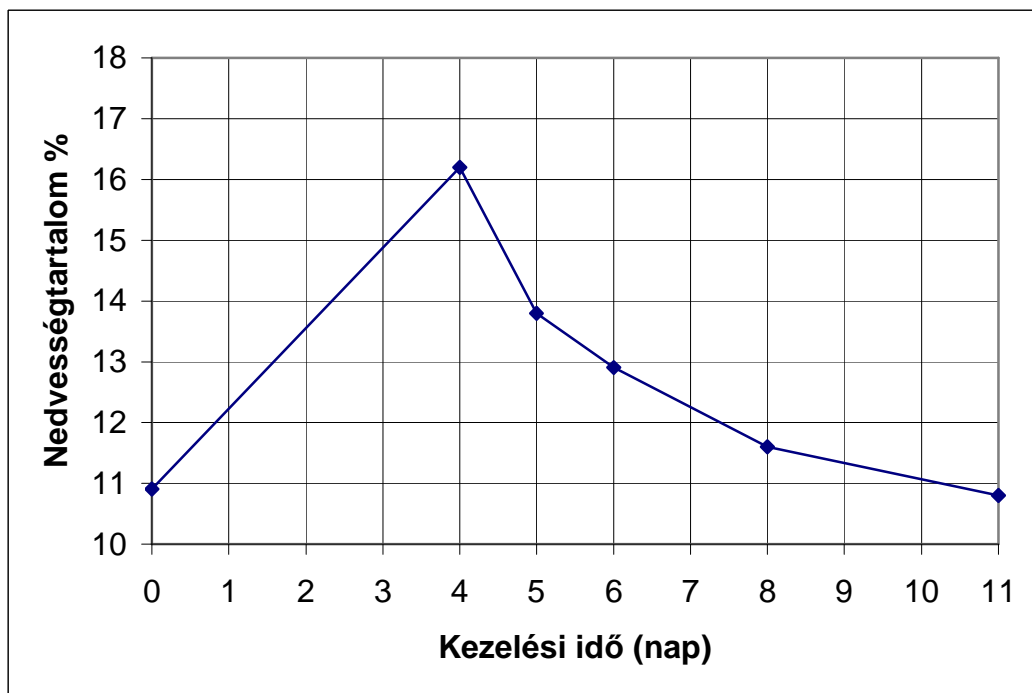
A grafikonok és a színes fénykép alapján le kell vonnunk azt a következtetést, hogy a 100°C alatti gőzölés száraz faanyag esetében nem célszerű, mert a folyamat lassú, ezért túlságosan időigényes, és költséges. A vizsgálatok alapján az optimális gőzölési idő: 100°C-on 3-4 nap; 110°C-on 1 nap; 120°C-on 12 óra és 130°C-on 6 óra. Amennyiben kellően sötét árnyalatot kívánunk elérni, akkor 110°C-on 2 napig; 120°C-on 1 napig a gőzölést célszerű folytatni.

Vizsgálatainkkal feltártuk, hogy a gőzölés során, a telített vízgőzben levő száraz faanyag milyen mértékben vesz fel nedvességet. Megvizsgáltuk azt is, hogy a gőzölés során felvett nedvességtartalom hogyan távolítható el anélkül, hogy a faanyagot ismét szárítási ciklusnak vetnénk alá. A vizsgálat során megmértük a próbatestek tömegét a gőzölés előtt és után, majd átlagos laboratóriumi körülmények között (20-22°C és 40 % körüli relatív páratartalom) tároltuk őket. A száradás során naponta végeztünk tömegmérést. A mérési eredményeket 95°C-on gőzölt akác faanyag esetében a 13. ábra, 110°C-os gőzölés esetében a 14. ábra mutatja. Az adatokból megállapítható, hogy a gőzölés során a faanyag 4-6 %-nyi nedvességtartalmat vesz fel, de azt az egyheti tárolás során mesterséges szárítás nélkül leadja. A gőz formájában a faanyagba kerülő nedvességtartalomnak a faanyaghoz való kötődési módja további vizsgálatokat igényel. (Ezen elméleti szempontból nagyon fontos vizsgálatok eredményei jelen téma szempontjából nem lényegesek.) Az is látszik, hogy magasabb gőzölési hőmérsékleten a nedvességtartalom-növekedés erőteljesebb volt. Az összehasonlíthatóság kedvéért választottunk mindkét esetben 4 napos gőzölést.

A vizsgálatok alapján megállapítható, hogy a gőzölés során a száraz akác faanyag vesz fel vizet, de ez a víz nem kötődik „erősen” a faanyaghoz. Egyhetes tárolás során a faanyag „megszabadul” a gőzölés során felvett vízmennyiségtől. A szárítás utáni gőzölés tehát nem igényel újabb mesterséges szárítást. Ez a megállapítás jelentősen segíti a száraz akác faanyag ipari méretekben történő gőzölésének megvalósítását.



13. ábra A nedvességtartalom változása a gőzölés alkalmával(első 4 nap) és a laboratóriumi száradás során (5-11. nap), 95°C-on gőzölt akác faanyag esetében



14. ábra A nedvességtartalom változása a gőzölés alkalmával (első 4 nap) és a száradás során (4-11. nap), 110°C-on gőzölt akác faanyag esetében

Megvizsgáltuk, hogy az akác faanyag gőzölésével alkalmassá válik-e az Európába importált trópusi fafajok helyettesítésére. A trópusi fafajokat tartósságuk és sötét színük miatt részesítik előnyben a felhasználók. Az akác faanyaga a tartósság tekintetében állja a versenyt. Az Európában termesztett fafajok között a legtartósabb faanyagot adja. A

vizsgálatainkat a színbeli megfelelésre, elsősorban a kellően sötét szín elérésére koncentráltuk. A gőzöléssel elért alacsony világosságértékeket hasonlítottuk össze a trópusi fafajok világosságával, és megadtuk azokat a gőzölési paramétereket, melyekkel a trópusi fafajok színe megközelíthető. Természetesen a színezetbeli ekvivalenciát nincs reményünk megvalósítani, de talán ez nem is fontos kérdés. A felhasználókat elsősorban az unikális sötét szín vonzza, és a színezet másodlagos számukra.

Az alacsony világossági értékeket többnyire csak túlnyomásos gőzöléssel tudjuk előállítani. Kivételnek számít az afromoisa (*Afromoisa elata* H.) 60 egység körüli világossága, melyet 95°C-on 50-60 órás gőzöléssel tudunk az akácnál elérni. A sapupira (*Hymenolobium petraeum*) 55 körüli világosságát 90°C-on 4 napos gőzöléssel érhetjük el, és itt a sárga színezetben is csak 2 egység lesz az eltérés. A mutenye (*Guibaurtia arnoldiana*) 50 egység körüli világosságát gazdaságosan már csak 100°C körüli hőmérsékleten érhetjük el, 80-90 órás gőzöléssel. A merbau (*Intsia bijuga*) esetében a 48 körüli világosság érték 105 és 100°C között érhető el 2 nap alatt. A mahagóni (*Swietenia mahagoni*) 45 körüli világossága pedig 115-120°C között, egy napos gőzöléssel közelíthető meg. A kókuszdió (*Cocos nucifera*) 40 körüli világossága 120 C-on másfél napos gőzöléssel érhető el.

Az akácgőzölés eredményeit összefoglalva megállapítottuk:

Az akác faanyag színváltozása erősen függ a gőzölési hőmérséklettől. Ezért a reprodukálható szín eléréséhez gőzöléskor a hőmérsékletet állandó értéken kell tartani. A hőmérséklet növelésével a faanyag sötétedése egyre erőteljesebb. A 100°C alatti kezdeti gyors sötétedést egyre lassuló, de folyamatos sötétedés követi, de 100°C fölött a kezdeti erőteljes változás után a sötétedés egy közös értékhez tart, melyet a hőmérséklet növelésével egyre rövidebb idő alatt ér el. Ezen időtartam után a gőzölés már hatástalan.

Nem változik a sárga színezet a gőzölés első napján, ha a hőmérséklet 100°C alatt van. Ezt követően a sárga színezet folyamatosan csökken. A 100°C fölötti hőmérsékleteken a sárga színezet csökkenése hasonlóan történik, mint a világosság csökkenése.

A vörös színezet a gőzölés során jelentősen növekszik, javítva az esztétikai hatást. A színezetváltozást leíró függvényeknek maximumuk van, ami arra utal, hogy a színekpző vegyületek egy részét a gőz kioldja a fából. A kioldó hatás a hőmérséklet emelésével fokozódik, ezért a maximum helye a hőmérséklet-emelkedéssel egyre rövidebb

időpontokhoz vándorol. A gőzölési gyakorlat számára fontos, hogy az adott hőmérséklethez tartozó maximumnál tovább a gőzölést nem érdemes folytatni.

A gőzölés az akác faanyag esetében színhomogenizáló hatású. A hőmérséklet emelése és a gőzölési idő növelése egyaránt segíti a színhomogenizálást. A három színkoordináta közül a világosság szórásának csökkenése a legjelentősebb.

A korábbi nézetekkel szemben a száraz állapotú akác faanyag is jól gőzölhető. Ha a gőzölési hőmérséklet meghaladja a 95°C-t, akkor a színváltozás nem függ a faanyag nedvességtartalmától. A 95°C alatti hőmérsékleteken viszont a száraz faanyag színváltozása lassúbb, mint a nedves faanyagé. Ez a megállapítás azért nagyon fontos, mert sok esetben eltérő nedvességtartalmú rakatok kerülnek egymás mellé a gőzölőkamrában. Ilyenkor a 100°C közeli hőmérséklet alkalmazása javasolt az egyöntetű szín érdekében.

A száraz kiinduló állapotot követő gőzölés során a faanyag vesz fel 5-6%-nyi nedvességet, de az így felvett víz egyheti laboratóriumi hőmérséklet és páratartalom melletti tárolásnál képes eltávozni. A gyakorlat számára fontos eredmény, hogy a száraz állapotban gőzölt akác faanyag a gőzölés után nem igényel újabb mesterséges szárítást, amennyiben a gőzölést követő technológiai folyamat nem kíván 10-12%-nál alacsonyabb nedvességtartalmat.

A sötétre gőzölt akác faanyag egyes trópusi eredetű faanyagok helyettesítő faanyaga lehet. A gőzölés okozta színváltozás tekintetében nincs lényeges eltérés mag eredetű és a sarj eredetű akác faanyagok között.

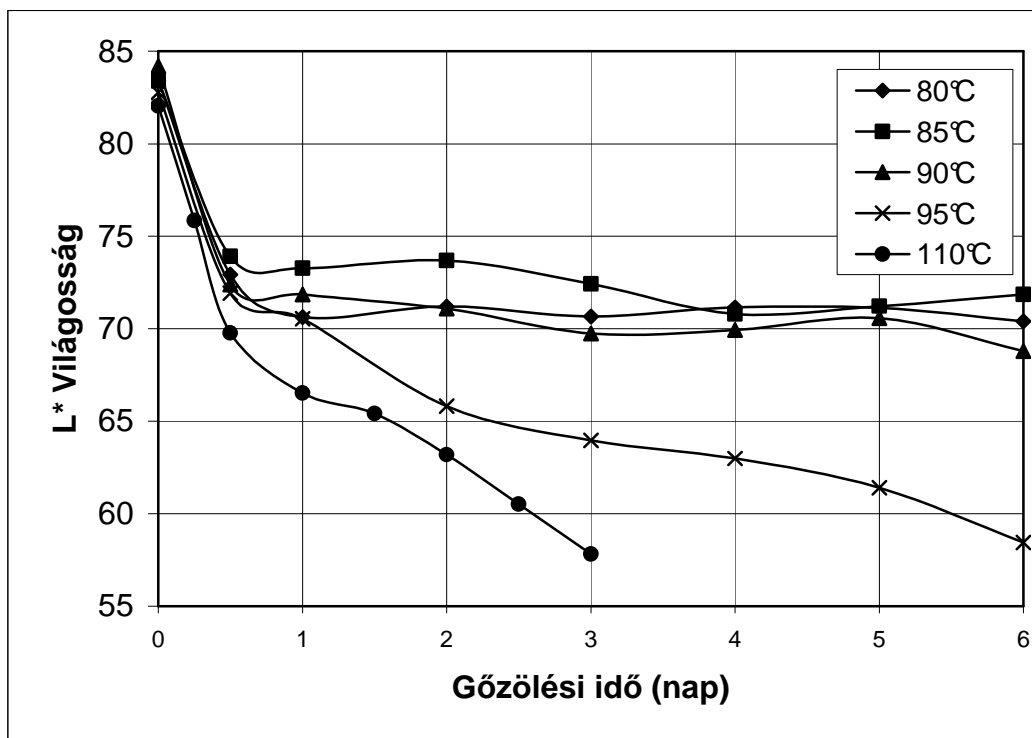
4.1.2. Bükkgőzölés

A bükk faanyag gőzölési vizsgálatait először nedves állapotú (45% körüli nedvességtartalmú) faanyagon végeztük el. A mintákat olyan pallókból vágtuk ki, melyek álgesztet (színes geszt) és fehér faanyagot egyaránt tartalmaztak. A mintakészítésnél ügyeltünk arra, hogy mindegyik tartalmazzon fehér és színes faanyagot is.

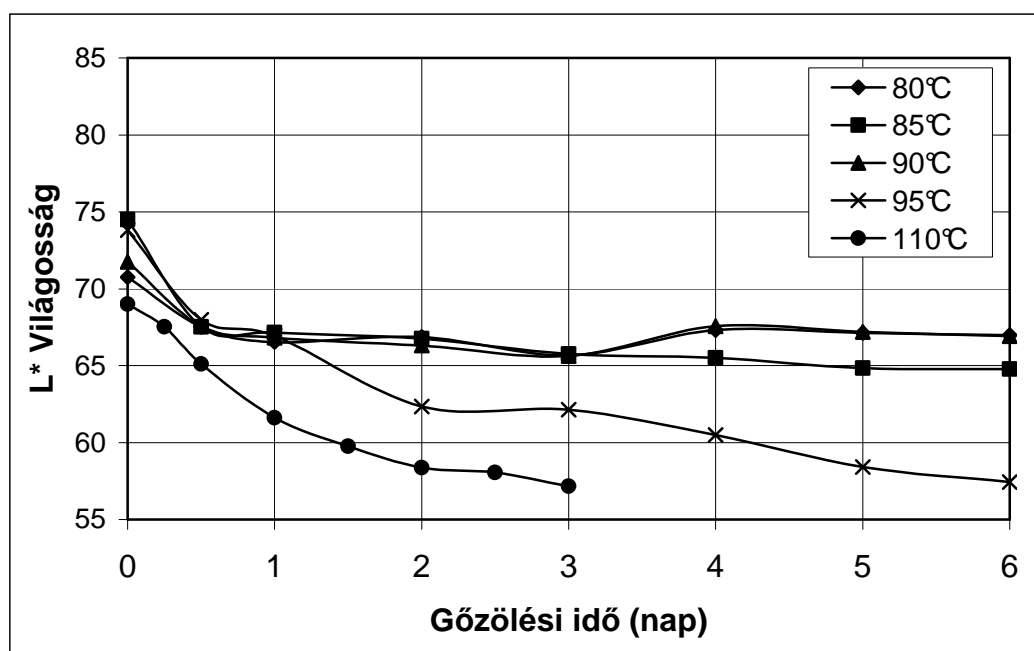
A vizsgálatok közben már szabad szemmel jól látható volt, hogy a színváltozás döntő része fél nap alatt lejátszódott. Egy nap után már nem történt észrevehető változás. Azt is megfigyeltük, hogy az álgesztes anyag színe alig változott, míg a fehér faanyag színe az álgesztes rész színe felé tolódott el. A változást jól szemlélteti az 5. kép, ahol egymás mellett láthatók a natúr és a gőzölt minták, melyek fehér és színes gesztet is tartalmaztak. Megállapítható, hogy a gőzölés hatására a fehér faanyag a színes geszthez hasonló

színárnyalatot vesz fel. Tehát a gőzölés alkalmas az álgesztet is tartalmazó bükk faanyag színhomogenizálására. Az is kiderült, hogy a színhomogenizálás alig függ az alkalmazott hőmérséklettől. Ezért költségtakarékossági okokból 80°C körüli hőmérsékleten célszerű ezt a műveletet elvégezni.

Az objektív színmérések pontosan mutatják a hőmérséklet és a gőzölési idő szerepét a bükk faanyag színváltozásában. Az összehasonlítás érdekében a nedves állapotban gőzölt fehér geszt világosságának változását a 15. ábra, a színes geszt világosságának változását a 16. ábra mutatja a gőzölési idő és a hőmérséklet függvényében. Az eredmények alapján megállapítható, hogy a hatásos gőzölési idő 18 óra körüli érték. Ez az idő alig függ a gőzölés hőmérsékletétől. Tovább gőzölve 95°C alatt a világosság változása nem függ a hőmérséklettől,



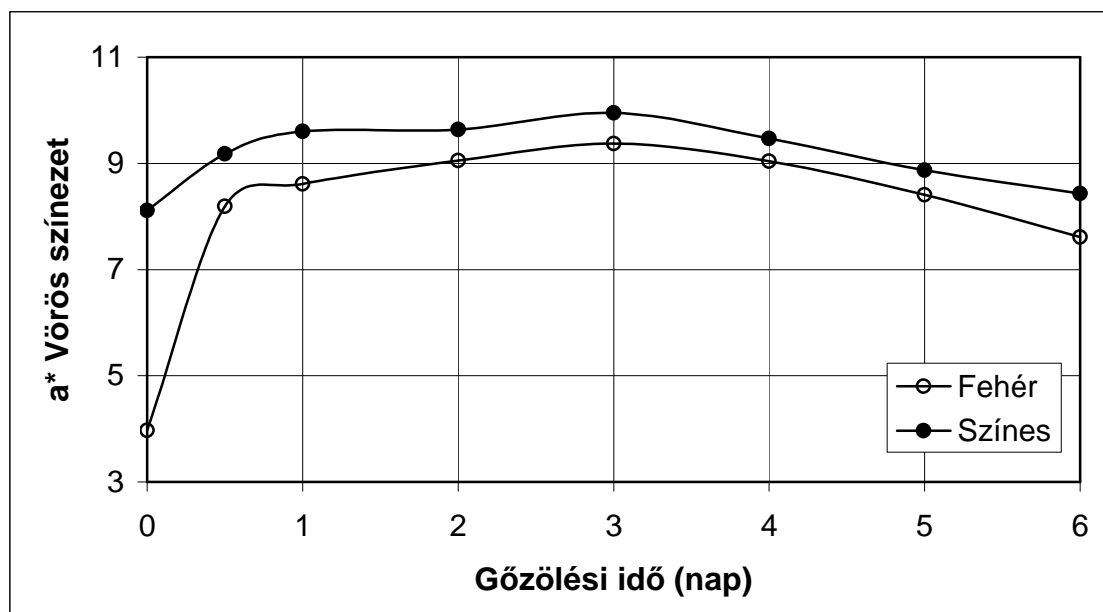
15. ábra A nedves fehér bükk faanyag világosságának változása a gőzölési idő és a hőmérséklet függvényében



16. ábra A nedves színes bükk faanyag világosságának változása a gőzölési idő és a hőmérséklet függvényében

és a világosság alig csökken a gőzölési idő növekedésével. A fenti megállapítások a fehér és a színes gesztre egyaránt vonatkoznak. A 95°C fölötti hőmérsékleteken viszont a világosság folyamatosan csökkent a vizsgált időintervallumban. Ez a csökkenés fehér faanyag esetében jelentősebb volt, mint a színes geszt esetében. A leghosszabb idejű gőzölési időknél már nem lehetett megállapítani, hogy eredetileg melyik volt a fehér illetve a színes geszt.

A vörös színezet növekedéséről hasonló megállapítást tehetünk, mint a világosság csökkenésének tendenciájáról (17. ábra). A fehér faanyag vörös színezete az első 18 órában sokkal erőteljesebben növekedett, mint a natúr állapotában már vörösebb álgeszté. Így a kétféle faanyag színezete is közel került egymáshoz. A gőzölés további időtartamában a változás minimális volt mindkét faanyagtípus esetében. A gőzölés során a szín sárga tartalmában nem történt lényeges változás, ezért ezzel a továbbiakban nem foglalkozunk. A 95°C fölötti hőmérsékleteken és túlnyomáson gőzölve a világosság csökkenése nem áll meg 1 nap után, hanem tovább csökken, bár gyengébb intenzitással. A színpontoknak az L* tengelytől mért távolsága szintén csökken. Túlnyomáson gőzölve már szabad szemmel feltűnik, hogy a gőzölés által keltett új színben jobban dominál a szürke, mint a vörös (míg atmoszférikus nyomáson ennek éppen az ellentettje valósul meg).

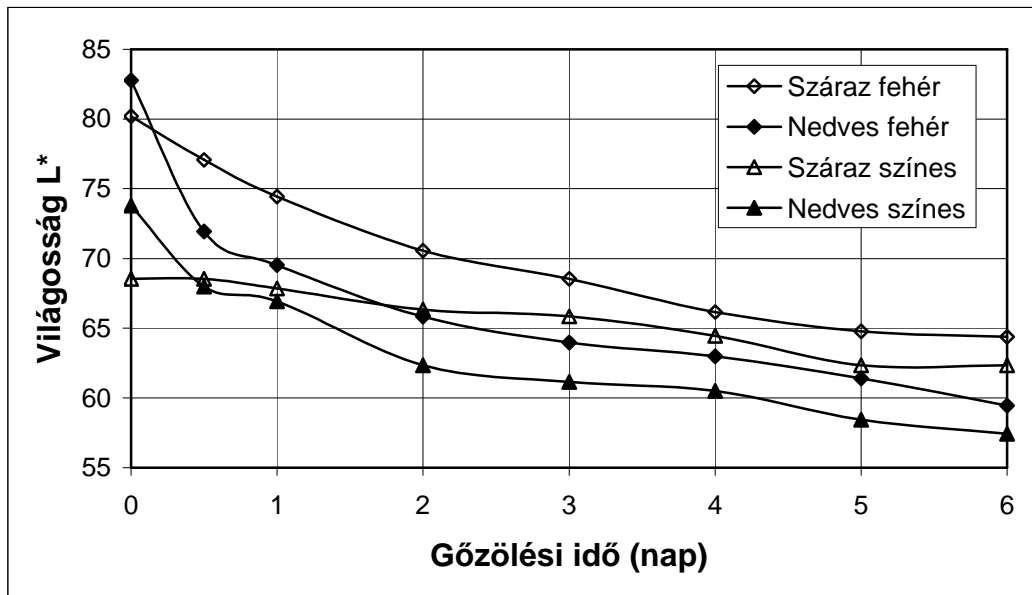


17. ábra A vörös színezet változásának időfüggése fehér és színes geszt esetében 95°C-os gőzölésnél

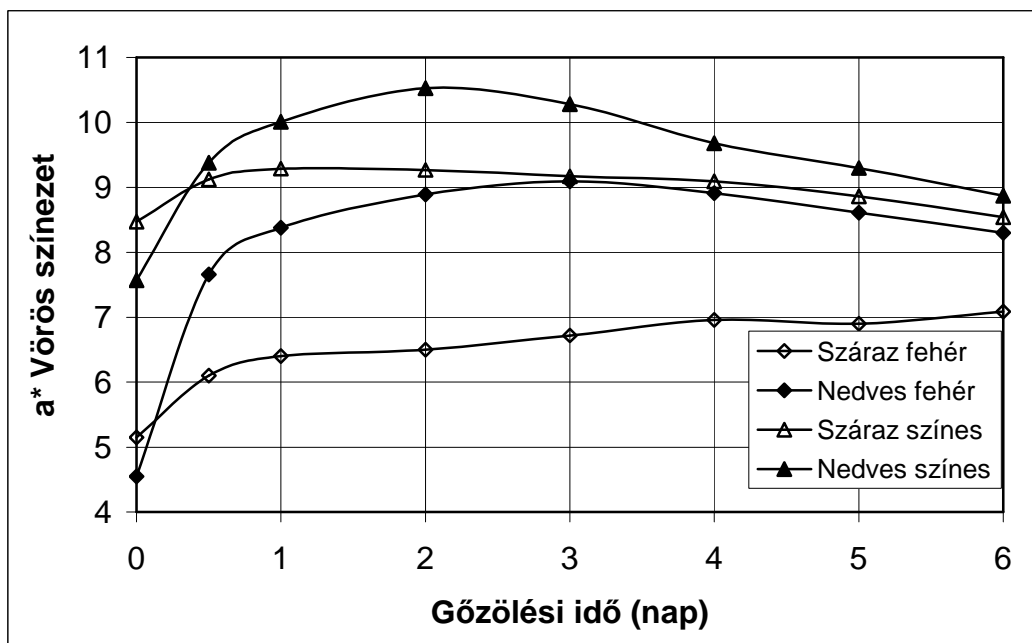
A fentiek alapján megállapíthatjuk, hogy mind gazdaságossági mind esztétikai szempontból bükk faanyag esetében csak az atmoszférikus nyomáson történő gőzölés javasolható. Az is jól látszik, hogy a gőzölés színhomogenizáló hatású a fehér és színes gesztet vegyesen tartalmazó faanyag esetében.

A száraz bükk faanyagra vonatkozó vizsgálatok eredményeit a 18-21. ábrák mutatják. A 18. ábrán a világosság változását szemléltetjük 95°C-os gőzölés esetén, bemutatva valamennyi vizsgált eset világosságának változását. Szembetűnő, hogy a száraz minták világosságának csökkenése közel egyenletes az egész vizsgált időtartamban. Nem tapasztalható az a jelentős csökkenés az első fél napban, amit a nedves mintáknál látunk. A végső világosság értéke száraz faanyagnál magasabb mint a nedves faanyagnál, és ez a fehér és színes gesztre egyaránt vonatkozik.

A vörös színezet változását 95°C-os gőzölésnél a 19. ábra szemlélteti. Itt is jól látszik, hogy a száraz faanyag színének vörös irányú eltolódása kisebb mértékű mind fehér mind színes geszt esetében. Szembetűnő, hogy a száraz fehér geszt színe alig vörösödik a nedves fehér geszthez képest. A gyakorlatban viszont éppen ezen vörös irányú eltolódás létrehozása érdekében gőzölik a fehér bükk faanyagot. Megállapítható, hogy a vörös irányú elszínezés érdekében nem javasolható a száraz állapotú fehér bükk faanyag gőzölése. A grafikonokról az is leolvasható, hogy a színes és a fehér bükk faanyag színhomogenizálása sem alkalmas a száraz állapotban történő gőzölés,



18. ábra A világosság változásának időfüggése nedves és száraz minták esetében 95°C-os gőzölésnél

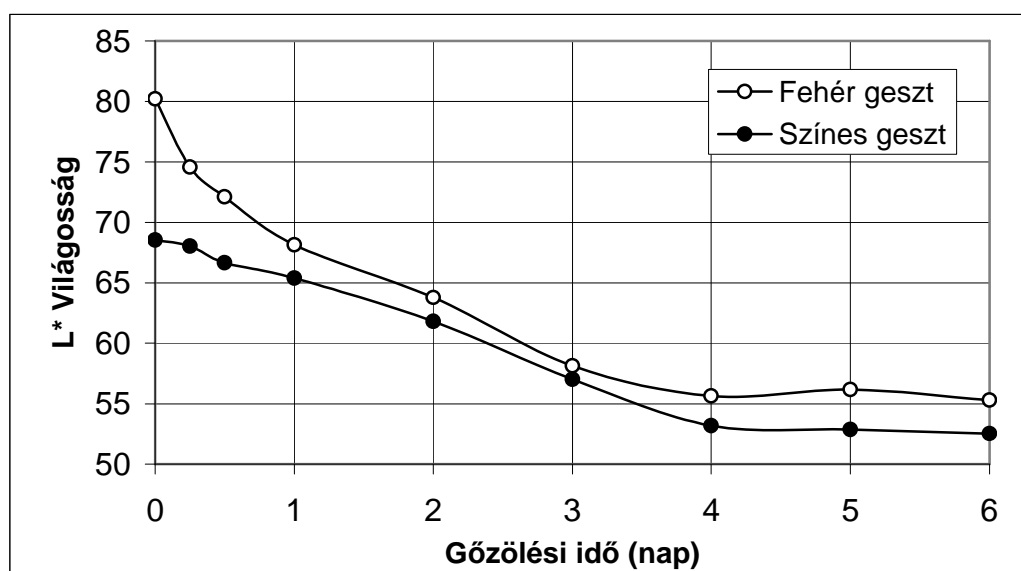


19. ábra A vörös színezet változásának időfüggése nedves és száraz minták esetében 95°C-os gőzölésnél

hiszen sokkal nagyobb eltérés marad, mint amit a nedves faanyag gőzölésekor tapasztalunk.

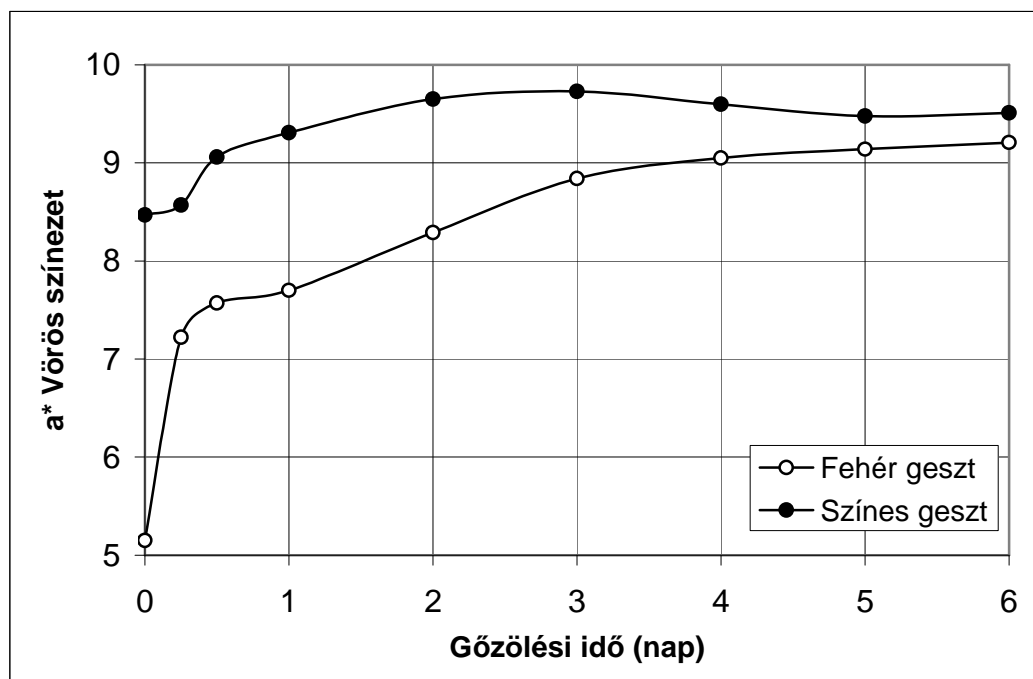
Korábban már megállapítottuk, hogy a nedves bükk faanyagot 100°C fölött nem célszerű gőzölni a fehér gesz vörös irányú elszínezése érdekében. Ezért most csak azt vizsgáljuk, hogy a száraz bükk faanyag túlnyomásos gőzölése (100°C fölött) alkalmas-e

a fehér és a színes geszt színhomogenizálására. A kísérlet eredményeit a 20-21. ábrák mutatják. A világosság mind a fehér mind a színes gesztnél folyamatosan csökken az első 3-4 nap alatt, de a fehér faanyag világosságának csökkenése intenzívebb volt, mint a színesé. Ennek köszönhetően 2 nap után a világosságok közel azonosak voltak. A vörös színezet változására a világossághoz hasonló, de növekvő tendencia volt jellemző. Itt 3-4 napban állapítható meg az az idő, ami alatt a fehér és színes geszt homogenizálódik. Meg kell jegyezni, hogy az így homogenizált minták világossága lényegesen alacsonyabb érték, mintha a 100°C alatti nedves kiindulási állapotnál történt homogenizálás esetében. Tehát a 100°C fölötti gőzölés száraz faanyag esetében is nemkívánatos szürkésvörös színt eredményez. Ezért a 100°C fölötti gőzölés száraz bükk faanyag esetében sem javasolható, még a fehér és színes gesztet egyaránt tartalmazó faanyag színhomogenizálására sem.



20. ábra A világosság változásának időfüggése száraz fehér és színes geszt esetében 105°C-os gőzölésnél

Bükk faanyag esetében is megvizsgáltuk a száraz faanyag gőzölés során történő visszanedvesedését, illetve az így felvett vízmennyiség elvesztésének tendenciáját mesterséges szárítás beiktatása nélkül. Bükk esetében a nedvességfelvétel a gőzölés során lényegesen nagyobb volt, mint az akác esetében. A két faanyag eltérő anatómiai szerkezete miatt ez az eredmény várható volt. Mind 95°C-on mind 105°C-on gőzölve a nedvességtartalom a négy napos gőzölés során közel 9 %-kal nőtt. A bükk faanyag is, az akáchoz hasonlóan egy hét laboratóriumi klímán történt szárítás során elvesztette a



21. ábra A vörös színezet változásának időfüggése száraz fehér és színes geszt esetében 105°C-os gőzölésnél

gőzölés során felvett nedvességtartalmát. A faipar számára kedvező, hogy a száraz állapotban gőzölt faanyag által gőz állapotban felvett vizet könnyen leadja a gőzölt bükk faanyag. Ennek oka itt számukra közömbös, de elméleti szempontból az így felvett víz kötési mechanizmusának feltárása fontos további feladat a fa-víz kapcsolat feltérképezése szempontjából.

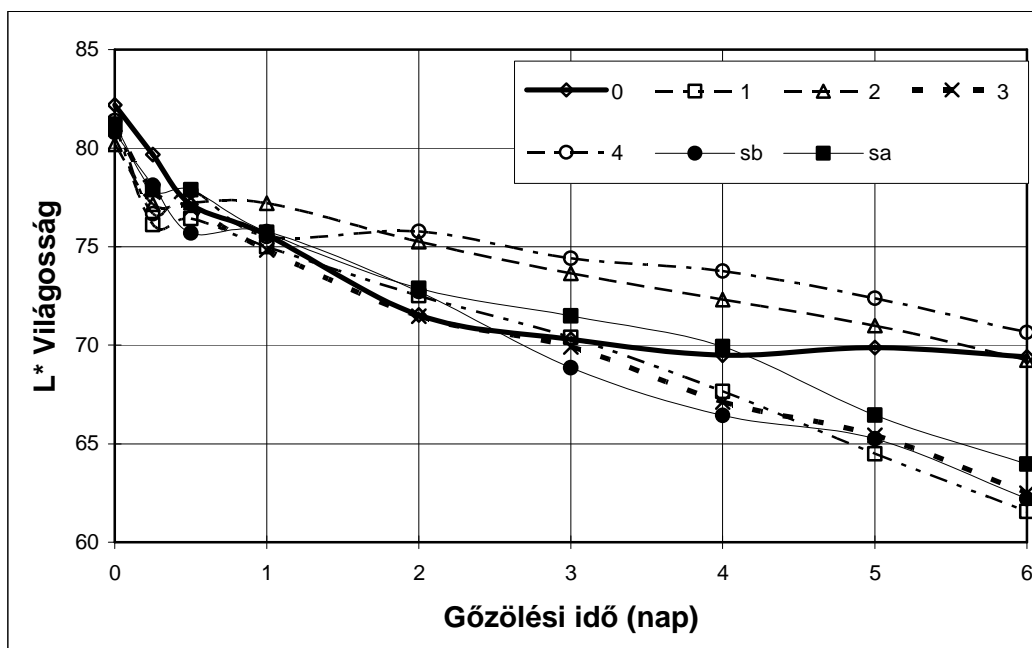
A bükkgőzölés eredményeit összefoglalva megállapítottuk:

Gőzöléskor a bükk faanyag színváltozásának döntő része 18-20 óra alatt lejátszódik. Ez a színváltozás 95°C alatt nem függ a gőzölési hőmérséklettől, és egy nap után már nincs lényeges színváltozás. A 95°C fölötti hőmérsékleteken a színváltozás nem áll meg az első nap után, hanem tovább folytatódik, de a keletkező szín egyre szürkébb, nem tetszetős árnyalatú lesz. Ezeken a hőmérsékleteken a gőzölési idő és a hőmérséklet növelésével egyre sötétebb de egyre szürkébb színek érhetők el. A gőzölő kamrák feltöltésekor ügyelni kell arra, hogy a rakat azonos nedvességtartalmú faanyagot tartalmazzon, mert a gőzölt anyag színhomogenitása csak így biztosítható. Megállapítottuk, hogy a gőzölés alkalmas a színes álgesztet is tartalmazó bükk faanyag színének homogenizálására, mert a fehér részek színe az álgeszt színehez közeledik, miközben az álgeszt anyag színe alig változik. Költségtakarékosság és a kedvezőbb szín szempontjából a 100°C alatti gőzölési hőmérsékletek javasolhatók.

4.1.3. Gyertyángőzölés

A gyertyán kiváló keménységű, nagy szilárdságú faanyag. Bútoripari felhasználásának fő akadálya a jellegtelen szürkésfehér színe. Ezért vizsgálatokat végeztünk a gőzöléssel történő színváltoztatás lehetőségeinek feltérképezésére. Mivel a gyertyán faanyag extrakt anyag tartalma csekély, kevés esélyt láttunk a hidrotermikus színváltoztatásra. Ezért a gőzölő térbe jól gőzölhető nedves bükk, száraz bükk illetve száraz akác faanyagot is tettünk a gyertyán mellé. Mivel a bükk faanyagtól vártuk a legjelentősebb elszínezést, ezért azt négy különböző gyertyán/bükk arányban (0,16; 0,32; 0,48; 0,64) tettük a gyertyán faanyag mellé. (Ezeket az arányokat a grafikonokon rendre az 1; 2; 3; 4 számok jelölik.)

A gőzölt mintákat szabad szemmel vizsgálva kitűnt, hogy az enyhe, folyamatos szürkülés mellett számottevő barnulás a második naptól kezdődően játszódtott le. Megállapítottuk, hogy a minták valamennyi esetben a teljes keresztmetszetükben egyenletesen elszíneződtek.



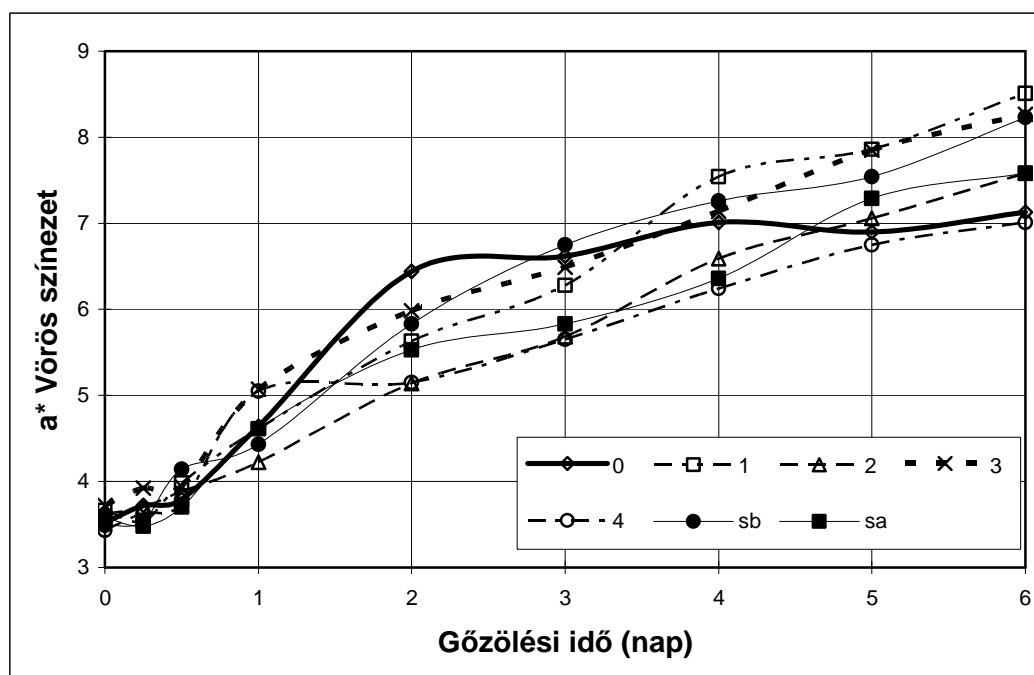
22. ábra A 95°C-on gőzölt gyertyán faanyag világosságának változása a gőzölési idő és a gőzölőtérben elhelyezett bükk és akác faanyag mennyiségének függvényében
Jelölések: a bükk/gyertyán arány a grafikonon szereplő szám 0,16 szorososa, sb= száraz bükk (0,26), sa= száraz akác(0,26)

Az objektív színméréssel meghatározott színváltozásokat a 22-24. ábrák szemléltetik. A 22. ábrán a 95°C-on történt gőzölés hatására bekövetkezett világosság-csökkenést mutatjuk be. Jól látható a folyamatos világosság csökkenés. Szembetűnő, hogy a

várakozásokkal ellentétben a sötétedésben nem játszik szerepet a gőzölőben lévő gyertyán/bükk arány. Sőt, a csupán gyertyán faanyagot tartalmazó sorozat két napig a többihez hasonló sötétedést mutatott.

Váratlan volt az az eredmény is, hogy a gőzölés során az egyes sorozatok színpontjai távolodtak egymástól. Az eddigi tapasztalatok alapján a gőzölés közelebb hozta egymáshoz az eredetileg eltérő színeket akác és bükk faanyag esetében. Ezzel szemben gyertyán esetében a gőzölés a viszonylag homogén színezetű sorozatok világosságát számottevően eltávolította egymástól, tehát növelte a gőzölt termék színbeli inhomogenitását. A gőzölés első két napja során nem volt lényeges különbség az egyes sorozatok között. Két nap után viszont a csak gyertyán faanyagot tartalmazó gőzöléseknél a világosság csökkenése lelassult és hamarosan megállt. A vegyes töltetű gőzöléseknél viszont a világosság csökkenése folyamatos volt a vizsgálat teljes időtartama alatt.

A szín tekintetében a szem számára a világosságnál fontosabb színjellemző a színezet. A színezet-változásokat a 23-24. ábrák szemlélteti. A 23. ábrán a színezet vörös tartalmának változását mutatjuk be. A színpontok a gőzölési idő növekedésével arányosan tolódtak el a vörös irányában. Az egyes sorozatok közötti eltérés a gőzölés során növekedett. A vörös

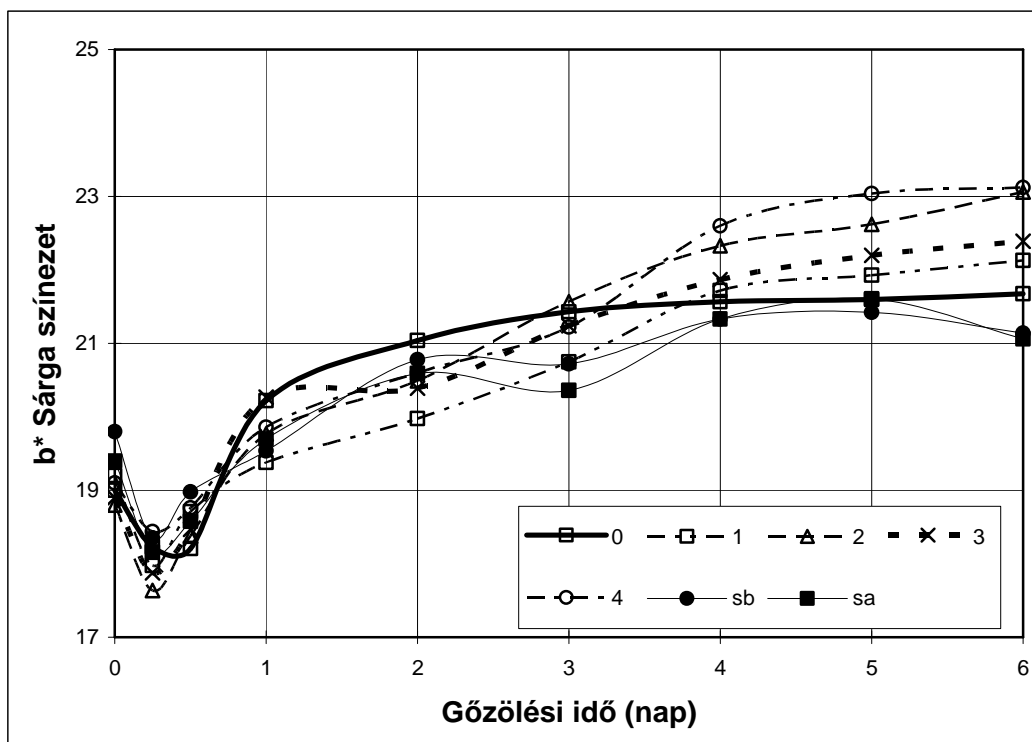


23. ábra A 95°C-on gőzölt gyertyán faanyag vörös színezetének változása a gőzölési idő és a gőzölőtérben elhelyezett bükk és akác faanyag mennyiségének függvényében (A jelölések megegyeznek a 22. ábra jelöléseivel.)

irányú eltolódás szempontjából sem volt szerepe a gyertyán mellé berakott másik faanyag mennyiségének. Két nap után az egymagában gőzölt gyertyán minták színezetváltozása lelassult illetve megállt, a többi sorozat esetében viszont tovább növekedett. Ez a jelenség ad lehetőséget a gyertyán faanyag színének vörös irányú módosítására.

A színezet sárga tartalma (24. ábra) a gőzölés első negyed napján egyöntetűen csökkent, majd egyenletesen növekedett. A sorozatok közötti színbeli inhomogenitás itt is növekedett. A gyertyán/bükk arány itt sem befolyásolta a színeltolódást. A sárga irányú színezet eltolódás lényegesen kisebb volt, mint a vörös irányú. A száraz kezdő állapotú bükk faanyaggal együtt gőzölve a gyertyán ugyanúgy viselkedett, mint az egyedül gőzölt gyertyán faanyag. Hasonlóan viselkedett a száraz akácot tartalmazó sorozat is.

A kísérletek alapján megállapíthatjuk, hogy a gőzölés során az akác és a bükk faanyagból színeképző vegyületek oldódnak ki, melyek a telített vízgőz segítségével bejutnak a gyertyán faanyagba és elszínezik azt. A száraz akác és bükk segédanyagok



24. ábra A 95°C-on gőzölt gyertyán faanyag sárga színezetének változása a gőzölési idő és a gőzölőtérben elhelyezett bükk és akác faanyag mennyiségének függvényében (A jelölések megegyeznek a 22. ábra jelöléseivel.)

esetében a kioldódáshoz több idő kell, hiszen a vízgőznek előbb át kell nedvesítenie ezeket a faanyagokat, és csak ezután kezdődhet meg a kioldódás. Mivel a gőzölési idő növelése költségigényes, a száraz segédanyagok alkalmazása az iparban nem gazdaságos.

Ha a három grafikont együtt vizsgáljuk, akkor a fent említett általános tendenciák mellett kitűnik, hogy a csak gyertyán faanyagot tartalmazó sorozat változásai (a többitől eltérően) az első két napban voltak jelentősek. A gőzölés további részében a színváltozás stagnált esetenként kis mértékben visszafordult. Szabad szemmel összehasonlítva a sorozatokat megállapítható, hogy a bükk faanyag jelenléte a gyertyán színét kis mértékben a gőzölt bükk barnásvörös árnyalata felé tolta el. Az akác viszont a tölgyre emlékeztető barna árnyalatot eredményezett.

A 85°C-on történt gőzölés mintáit megvizsgálva megállapítottuk, hogy a barna irányú eltolódás lényegesen lassúbb volt mint 95°C-on. Számottevő színváltozás csak az 5. nap környékén kezdődött, amikor már kellő mennyiségű extrakt anyag került a gőztérbe. Ez a tapasztalat is alátámasztja, hogy a gyertyán faanyag elszínezéséhez szükséges extrakt anyagok jelenléte szükséges a gőzölőtérben. Ezek kioldódási sebessége viszont hőmérsékletfüggő. A lassú színváltozás miatt, gazdaságossági okokból 95°C alatti hőmérsékleten a gyertyán gőzölése nem javasolható.

A gyertyángőzölés eredményeit összefoglalva megállapítottuk:

A gyertyán faanyag gőzölése a 100°C-hoz közeli hőmérsékleteken javasolt. (Amennyiben fizetőképes kereslet mutatkozik, a lényegesen drágább -100°C feletti nyomásálló hengerben történő, sötétebb színeket adó gőzöléssel előállított gyertyán faanyagra, akkor a hőmérséklet tovább növelhető.)

A vizsgált tartományban a gyertyán/bükk arány nem volt hatással az elszíneződésre. A 95°C-os hőmérsékleten a gyertyán faanyagot egyedül két napnál tovább nem érdemes gőzölni, mivel később már nincs számottevő színváltozás. Az eredmény egy enyhén sárgás világosbarna árnyalat lesz.

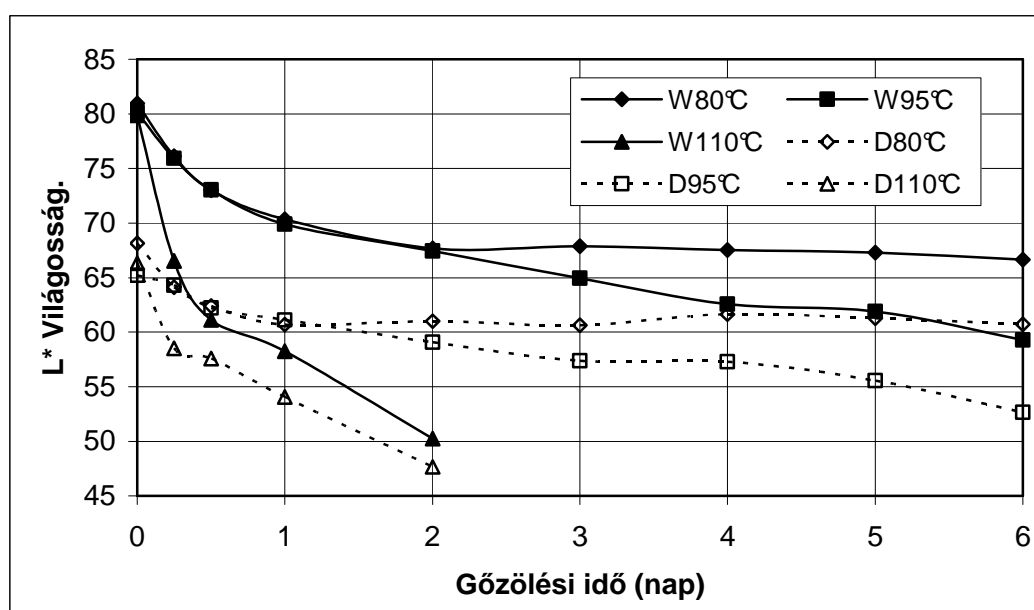
A gyertyánt a bükk faanyaggal együtt gőzölve a gőzölési időnek elsősorban a gazdaságosság szab határt. Az eredmény kissé a vörösbe hajló világosbarna árnyalat, ami a gőzölési idő növelésével sötétedik. A gyertyánt az akác faanyaggal együtt gőzölve a kapott világosbarna szín a tölgy színére emlékeztet.

A gőzöléssel történő színváltoztatásnak nagy előnye, hogy a faanyagba nem viszünk be toxikus anyagokat, és vízben oldódó anyagok sem keletkeznek. (Ezek fontos követelmények, ha óvodai és iskolai bútorok előállításáról van szó.)

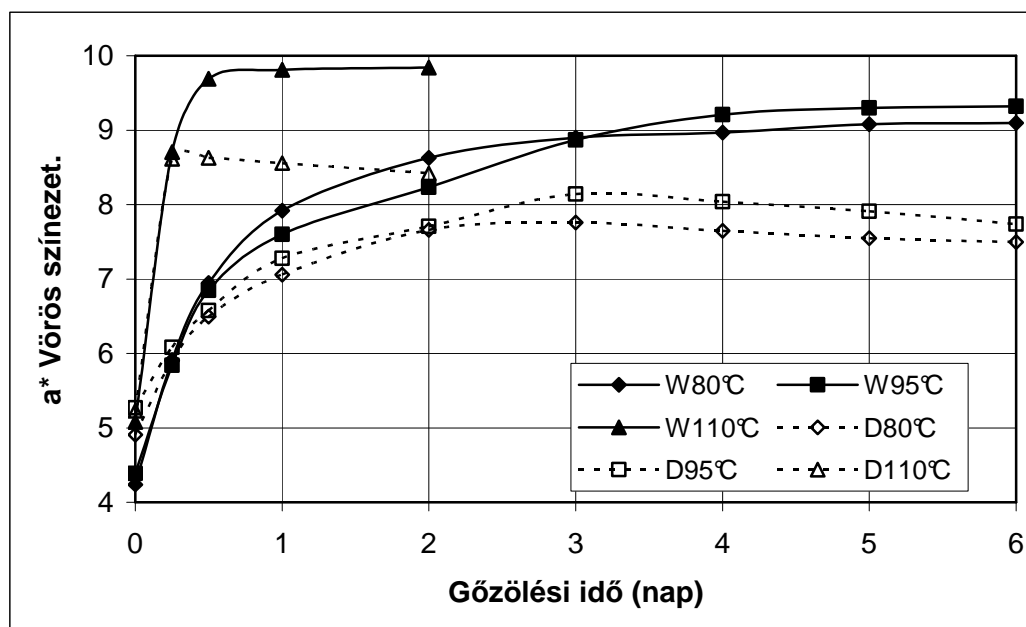
4.1.4. Csertölgygőzölés

A vágásérett csertölgy faanyag igen széles, világos színű szíjácsot tartalmaz. A világos szíjács és a sötét geszt határán éles színbeli eltérés mutatkozik. Ez az eltérés még jelentősebb, ha a faanyag sötét álgesztet tartalmaz. Bár a keménysége és kopásállósága miatt a szíjács is alkalmas volna parkettakészítés céljaira, de a nagy színkontraszt miatt a szíjácsot és gesztet is tartalmazó frízek kevésbé értékesek (csak olcsó „rusztikus” parketta gyártható belőlük). Ezért próbáltuk ki a gőzölésben rejlő színhomogenizáló hatás alkalmazását. Meghatároztuk azokat a gőzölési paramétereket, melyek mellett a színhomogenizálás a legjobban érvényesül. A csertölgy gőzölésére a szakirodalomban még nincsenek adatok.

A gőzölést 80, 95 és 110°C-on végeztük el olyan mintákon, melyek sötét álgesztet és fehér szíjácsot is tartalmaztak. A minták nedvességtartalma 55% körüli volt. A gőzölés eredményeit az alábbi ábrák mutatják. Megállapítható, hogy 100°C alatt az első két napban a világosság csökkenése nem függ a hőmérséklettől (25. ábra). Két nap után 95°C-on további sötétedés következett be, 80°C-on viszont nem történt további sötétedés. Ezek a megállapítások a szíjácsra és a gesztre egyaránt vonatkoznak. A fehér és a sötét részek közeledése egy napig tart, de a folyamat döntő része fél nap alatt lejátszódik. A 110°C-os gőzölés hatásosabb, mint az alacsonyabb hőmérsékletűek. A két görbe közeledése



25. ábra A világosság változása a gőzölési idő függvényében (W: fehér szíjács, D: sötét geszt)



26. ábra A vörös színezet változása a gőzölési idő függvényében (W: fehér szijács, D: sötét geszt)

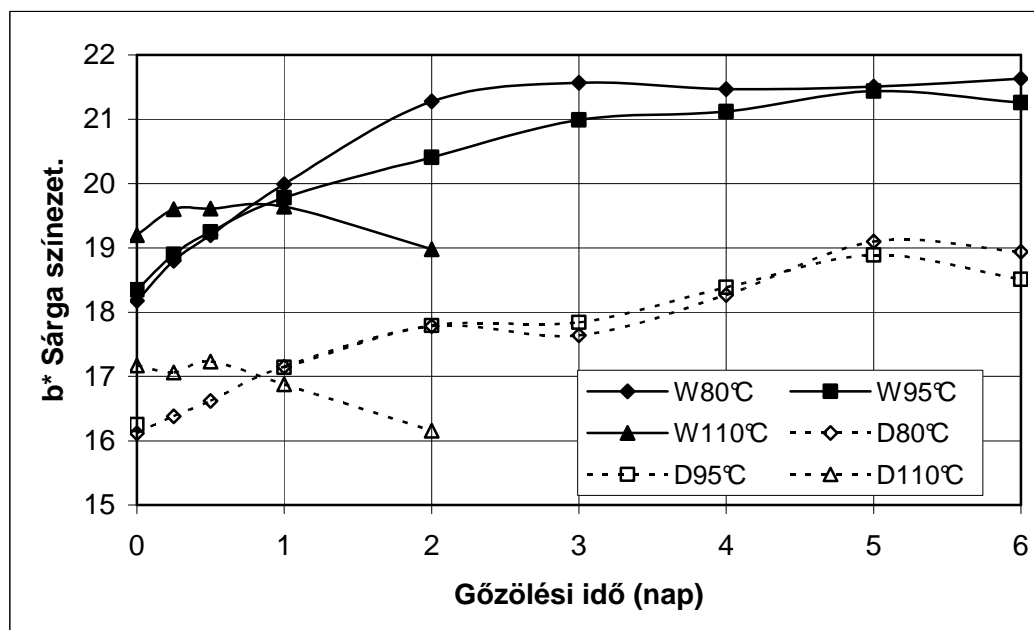
(a homogenizálódás) itt fél nap alatt lejátszódik. Bár mindkét árnyalat tovább sötétedik a további gőzöléssel, de nem közelednek egymáshoz.

A vörös színezet 100°C alatta szijácsnál gyorsabban növekszik, mint a gesztnél, ezért a görbéknek van metszéspontja 8 órás gőzölési idő környékén (26. ábra). Elméletileg ez lenne az optimális gőzölési idő, de világosság változására is tekintettel kell lenni. Ezért 100°C alatt

a félnapos gőzölés javasolható. A görbék 110°C-on viszont 6 óra után elválnak egymástól. Mindkét paraméterre (L^* , a^*) tekintettel a javasolt gőzölési idő itt 8-10 óra.

A sárga színezet változása (27. ábra) nincs hatással a színhomogenizálásra, mivel itt a görbék párhuzamosan futnak. A köztük lévő távolság a gőzölés során nem változik.

Mivel a cser a gőzölés során a bükkhöz hasonlóan alig érzékeny a gőzölési hőmérsékletre, az alacsony hőmérsékletek javasolhatók a színhomogenizálás céljára. A laboratóriumi mérések alapján 100°C alatt 12-24 órás, 100°C fölött pedig 8-10 órás gőzölési idők javasolhatók, melyek a felfűtési időt nem tartalmazzák.



27. ábra A sárga színezet változása a gőzölési idő függvényében (W: fehér szijács, D: sötét geszt)

A gőzölésnek nagy előnye, hogy a csertölgy gesztjének jellegtelen szürkésbarna színét kis mértékben sötétíti, és karakteres barna színné alakítja. Vele párhuzamosan a geszthez képest elütően világos szijács is kellemes barnás színárnyalatot vesz föl, mely a gesztéhez hasonló színárnyalat. Ezáltal megvalósul a színhomogenizálás a geszt és a szijács között, amint ezt a 6. kép is szemlélteti.

A csergőzölés eredményeit összefoglalva megállapítottuk:

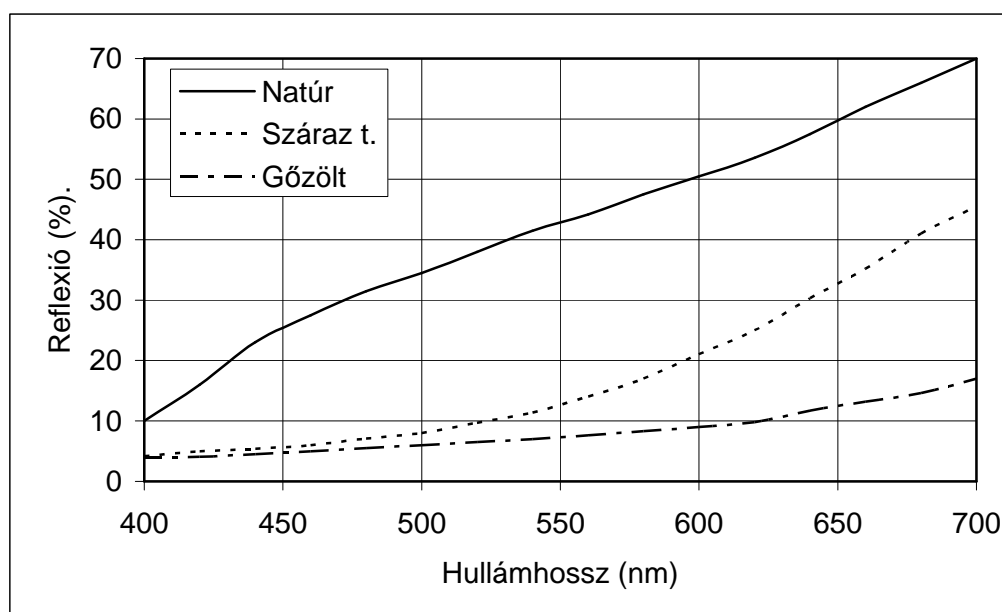
A cser faanyag a gőzölés során a bükkhöz hasonlóan alig érzékeny a gőzölési hőmérsékletre, ezért az alacsony (100°C alatti) hőmérsékletek alkalmazása javasolható. A gőzölés a csertölgy gesztjének jellegtelen szürkésbarna színét sötétíti, és karakteres barna színné alakítja. Vele párhuzamosan a geszthez képest elütően világos szijács is kellemes barnás színárnyalatot vesz föl, mely a gesztéhez hasonló színárnyalat lesz. Ezáltal megvalósul a színhomogenizálás a geszt és a szijács között, az eredmény pedig egy kellemes, barna árnyalat lesz. A színhomogenizálás 100°C fölötti hőmérsékleteken már 8-10 óra alatt megtörténik, 100°C alatt ugyanez 12-20 órát igényel.

4.1.5. A vízgőz jelenlétének szerepe a faanyag gőzöléssel történő színváltoztatásakor

A faanyagban lévő nedvességnek a termikus kezelésre gyakorolt hatását úgy vizsgáltuk, hogy az egyik kezelést abszolút száraz körülmények között végeztük. Zárt térben a próbatesteket foszforpentoxid fölött helyeztük el, ami agresszív módon szívja

magába a vizet. A másik párhuzamos kísérletben viszont a próbatesteket desztillált víz fölött helyeztük el zárt térben, így telített vízgőz alakult ki a próbatestek körül. A kísérlet kezdetekor a próbatestek nedvességtartalma 10-12% volt, és a termikus kezelés 90°C-on történt.

A 36 napig tartó kezelés által létrehozott színváltozást a 28 – 32. ábrák szemléltetik. Mindegyik ábra azt mutatja, hogy jelentős a különbség az abszolút száraz körülmények és a nedves körülmények között kezelt minták színváltozása között. A nem fényforrásként működő testek színe attól függ, hogy a rájuk eső fény spektrumából a különböző hullámhosszakon mennyit vernek vissza. Az akác faanyag reflexiós színeképét a 28. ábra mutatja. A többi vizsgált faanyag is hasonló módon viselkedett.

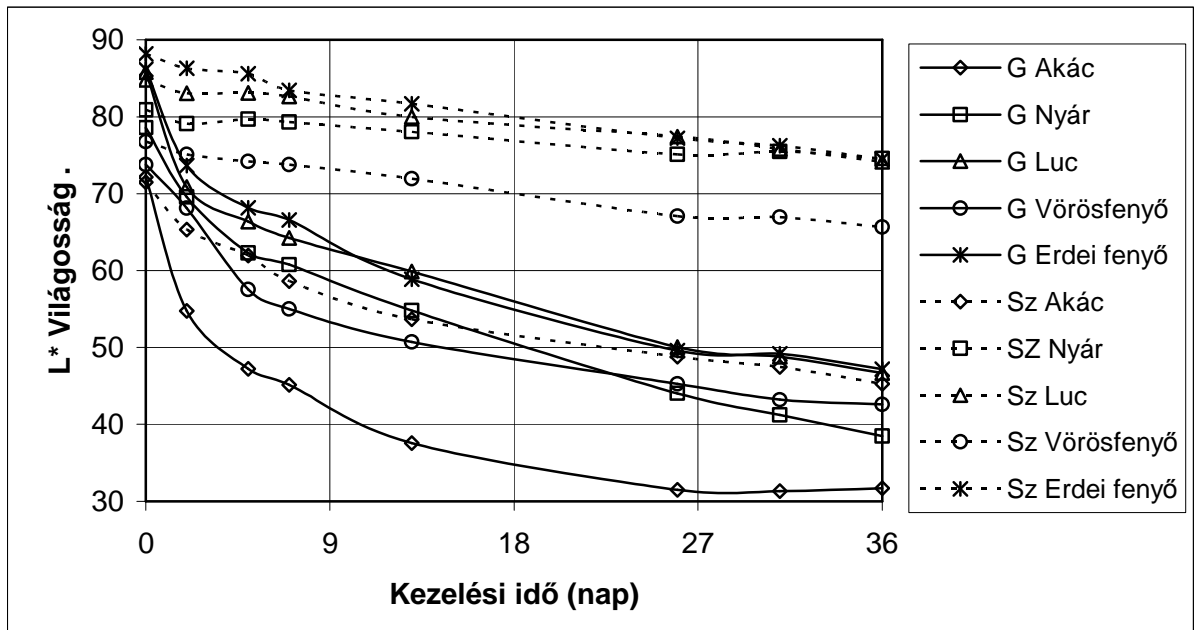


28. ábra A natúr és a 90°C-on abszolút száraz és nedves (gőzölés) körülmények között 36 napig kezelt akác faanyag reflexiós színeképe

A grafikonok jól szemléltetik, hogy a faanyagok természetes állapotukban a rájuk eső fényből a színek vörös oldalát jórészt visszaverik, míg a kék oldalát döntő mértékben elnyelik. A termikus kezeléseket után a fényelnyelés minden hullámhosszon fölerősödik. A reflexió csökkenése a sárga-zöld hullámhossz tartományban a legjelentősebb. A látható színváltozásra a reflexiós színekép változásából nehéz következtetéseket levonni. Ezért a színmérés eszközrendszerét kell segítségül hívni.

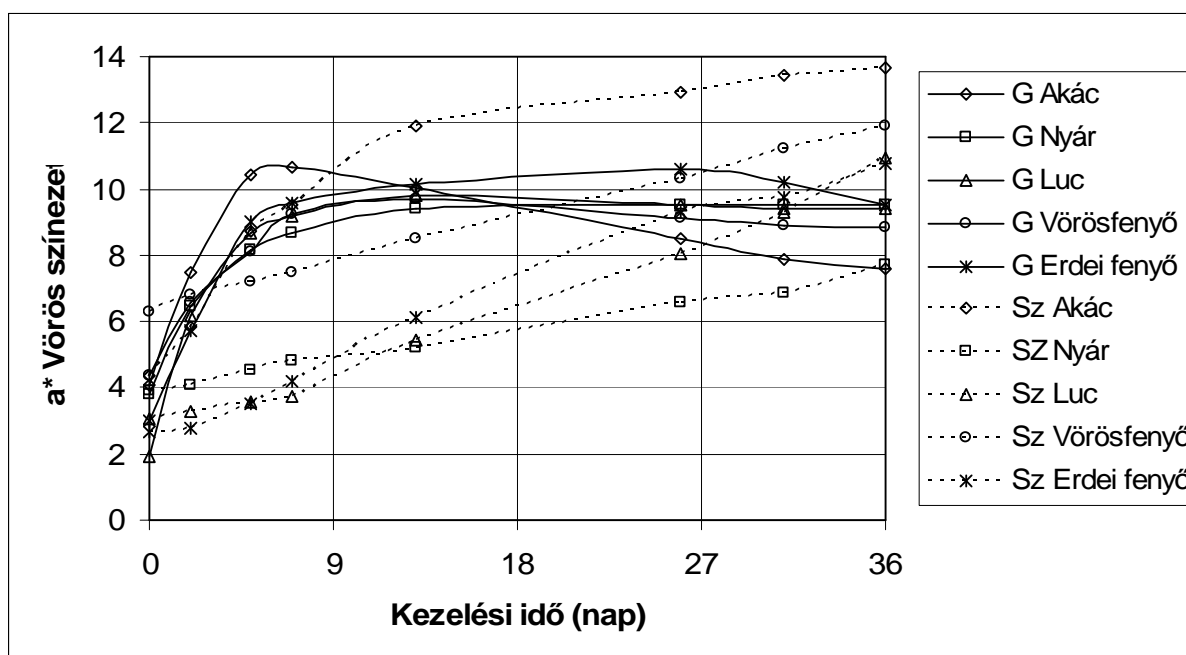
A világosság változása (29 ábra) az abszolút száraz környezetben csak kis mértékű, és a kezelés során egyenletesen csökkenő volt. Ez alól csupán az akác faanyag volt kivétel, mert itt a csökkenés a többinél intenzívebb volt a kezelés első negyedében.

Nedves körülmények között viszont a kezelés első néhány napján jelentős világosságcsökkenés történt, ami később egyenletes csökkenésbe ment át. Az akác faanyag itt is erősebb világosság csökkenést mutatott a kezelés kezdetén, mint a többi fafaj. Az akác faanyag abban is különbözött a többitől, hogy 26 nap után a világosság csökkenése megállt.



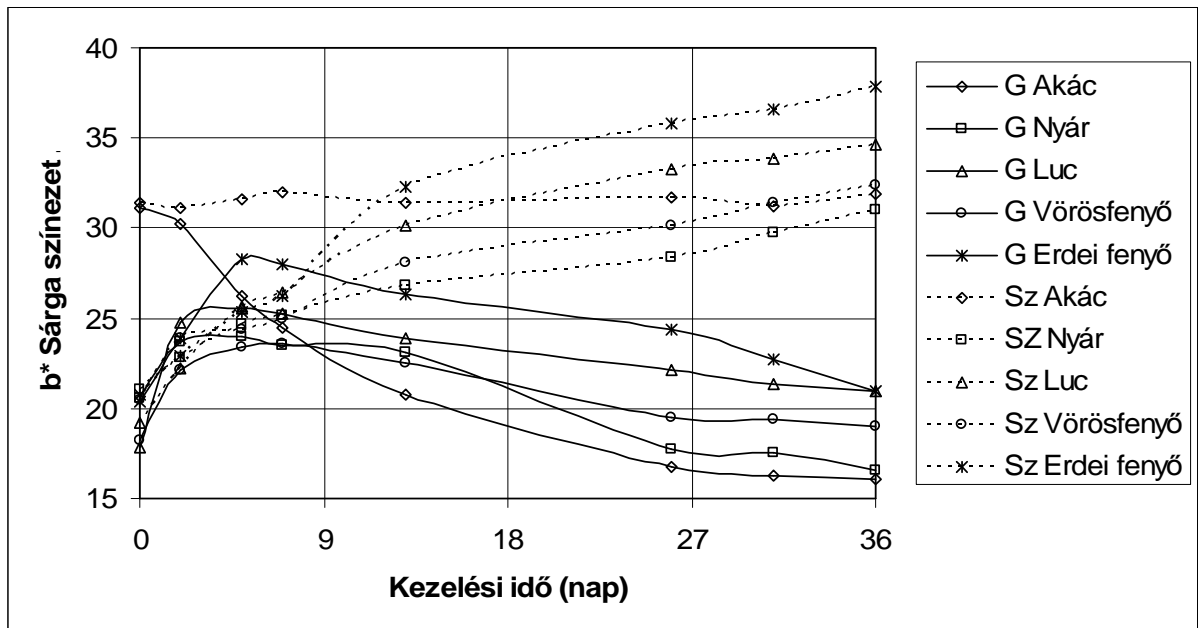
29. ábra A 90°C-on abszolút száraz (SZ) és nedves (G) körülmények között kezelt faanyagok világosságának változása a kezelési idő függvényében

A vörös színezet változása (30 ábra) hasonló volt a világossághoz csak ellentétes irányban. Itt növekedés történt. Az akác faanyag eltérő viselkedése itt is látható. Megállapítható, hogy ez a faanyag különösen hajlamos a vörös irányú elszíneződésre akár száraz, akár nedves körülmények között hőkezeljük. Az is szembetűnő, hogy a színes degradációs termékeket csak az akác esetében oldja ki számottevően a faanyagból a vízgőz. Az akác faanyagnak a többitől eltérő viselkedését magas extrakt anyag tartalma okozza.



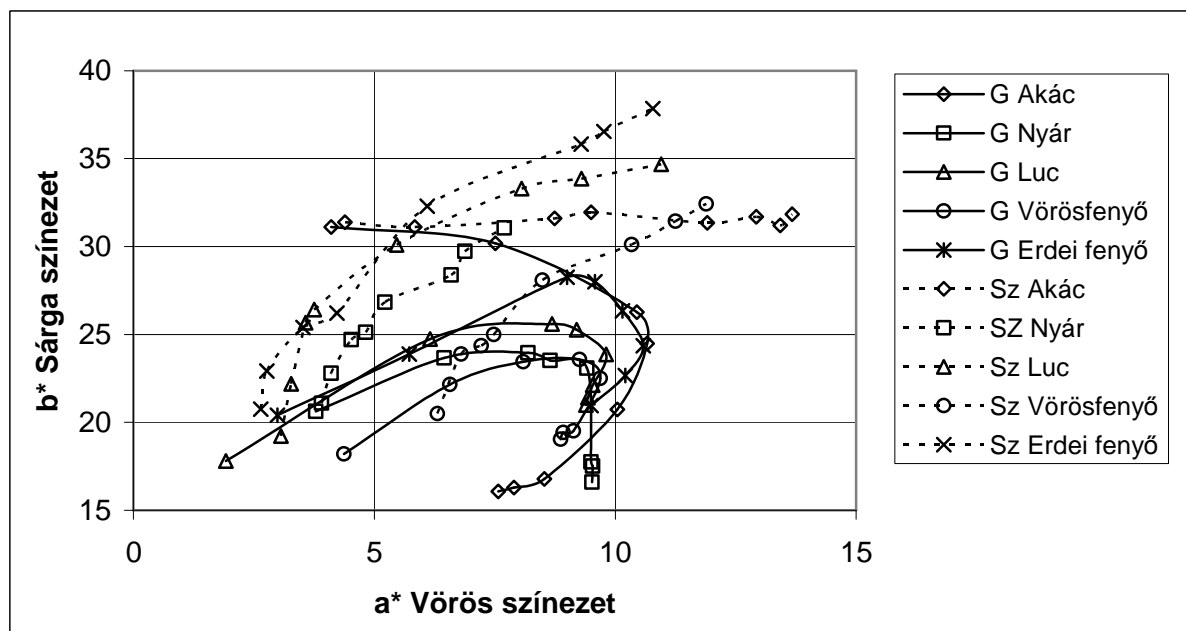
30. ábra A 90°C-on abszolút száraz (SZ) és nedves (G) körülmények között kezelt faanyagok vörös színezetének változása a kezelési idő függvényében

A sárga színezet változásában (31 ábra) volt a legnagyobb eltérés mind a fafajok között, mind a kétféle kezelés hatása között. Míg a kellően magas sárga színezetű akác faanyag abszolút száraz körülmények között gyakorlatilag nem mutatott változást, addig a többi folyamatosan sárgult. Nedves körülmények között az akác faanyag folyamatosan veszített sárga színezetéből, amíg a többiek sárgultak. Ez a sárgulás hasonló volt az abszolút száraz állapotbelihez, az első három napban a nedves állapotbeli változás erőteljesebb volt, mint az abszolút száraz állapotbeli. A legnagyobb eltérést az erdei fenyőnél figyelhetjük meg. Hat nap után ez a sárgulás megállt, és ezek a faanyagok is átvették az akác által diktált ütemet. Mivel az első időszakban a kétféle kezelés hatása közel egyforma volt, a nedves állapotbeli későbbi csökkenést a vízgőzzel, történő kioldódással lehet értelmezni. A színeképző vegyületek megjelentek a kondenzvízben, és barnára színezték azt. A kondenzvíz elszíneződése viszont már a kezelés kezdetén megkezdődött. Ebből arra kell következtetni, hogy a kioldódás a kezelés teljes időszakában folyamatos volt. Az összetett jelenség magyarázata az lehet, hogy eleinte a színeképző vegyületek keletkezése jóval intenzívebb volt, mint a kioldódás. Majd a keletkezés lelassult, de a kioldódás változatlan ütemben tovább folytatódott.



31. ábra A 90°C-on abszolút száraz (SZ) és nedves (G) körülmények között kezelt faanyagok sárga színezetének változása a kezelési idő függvényében

A színpontokat az a^* - b^* síkon ábrázolva (32 ábra) jól látszik, hogy abszolút száraz állapotban a színezetváltozás mindkét koordináta tekintetében szinte egyenletes. Ezzel ellentétben nedves körülmények között a görbék jellegzetes patkó alakot formáznak a színeképző vegyületek kioldódása miatt (Tolvaj és Faix 1996).



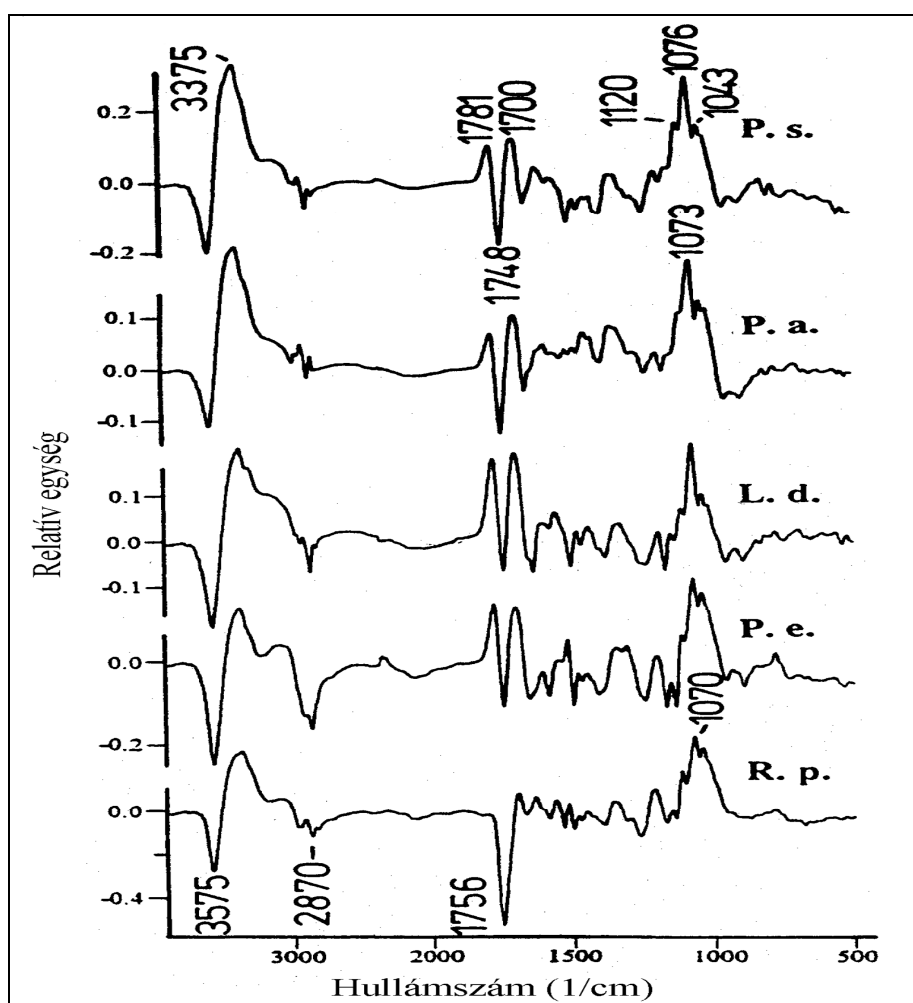
32. ábra A színpontok vándorlása abszolút száraz (SZ) és nedves (G) termikus kezelés során. (A görbék baloldali kezdőpontjai a kezeletlen állapothoz tartoznak. Ezeket követik a kezelt állapotok színpontjai 2, 5, 7, 10, 13, 18, 26, 31, 36 nap időrendben)

Megállapítható, hogy a víz jelenléte jelentősen felgyorsítja a színváltozást, ami száraz körülmények között csak lassan megy végbe. Az is jól látható, hogy a változások nedves körülmények között éppen a kezelés kezdetén erőteljesek. Ezeknek a jelenségeknek a kezelés költségei tekintetében van nagy jelentősége, hiszen a faiparban a 8-10 napnál hosszabb kezelésnek a költsége a termék árában már nehezen realizálható.

Megmértük a termikusan kezelt faanyagok diffúz reflexiós infravörös színeképét is. Az infravörös színekép változása információkat szolgáltat a faanyagban előforduló kémiai kötések számának változásáról. Előállítottuk a különbségi színeképeket, amelyek a kezelt minta és a kezeletlen minta színeképének a különbsége. Abszolút száraz körülmények között végzett termikus kezelésnél a változások kicsik voltak. A rájuk rakódó zaj miatt (mely összemérhető volt a jellel) alig voltak értékelhetők. Ez azt jelenti, hogy a színváltozások nem a faanyag fő kémiai összetevőinek a változásával kapcsolatosak. A lignin tipikus abszorpciójában 1510 cm^{-1} -nél nem történt változás. Kis mértékű növekedés volt tapasztalható a nem konjugált helyzetben lévő karbonil csoportok abszorpciójánál az $1700\text{-}1800\text{ cm}^{-1}$ tartományban. Tehát a száraz, termikus kezelésnél a színváltozás oka a kis százalékban jelen lévő extrakt anyagok változásában keresendő.

A 90°C -on történő gőzölés hatására az infravörös színeképben számottevő változások történtek, amit a 33. ábra szemléltet. Az egyes abszorpciós sávokhoz tartozó kémiai csoportokat a 2. táblázat (57. oldal) tartalmazza. Ezek a változások három területre koncentráálódtak.

A hidroxilcsoportok abszorpciójában csökkenés (3570 cm^{-1} környékén) és növekedés (3380 cm^{-1} környékén) egyaránt történt. A nem konjugált helyzetű karbonilcsoportok tartományában ($1650\text{-}1800\text{ cm}^{-1}$) összetett abszorpcióváltozás történt. Amíg a hidroxilcsoportok esetében nem volt lényeges különbség a vizsgált öt fafaj között, addig a karbonilcsoportok esetében az akác a többiektől eltérő módon viselkedett. Mindegyik fafaj esetében abszorpció csökkenés történt 1750 cm^{-1} környékén. Az akác kivételével a többi fafajnál abszorpciónövekedést is tapasztaltunk 1700 és 1780 cm^{-1} környékén. Ezen két maximum helye bizonytalan, valószínűleg ennél közelebb vannak egymáshoz. A valódi helyzetük azért nem állapítható meg, mert a köztük lévő abszorpció csökkenésből származó sáv levágja mindkettőnek az egymás felé néző oldalát. Így a maximumok helye eltolódik. Ha csak a vörösfenyő és a nyár minták színeképét vettük volna föl, akkor az 1750 cm^{-1} körüli abszorpciócsökkenést nem lehetett volna egyértelműen felismerni. De az akác és mellette a két másik fenyőféle színeképe ezt egyértelműen alátámasztja.

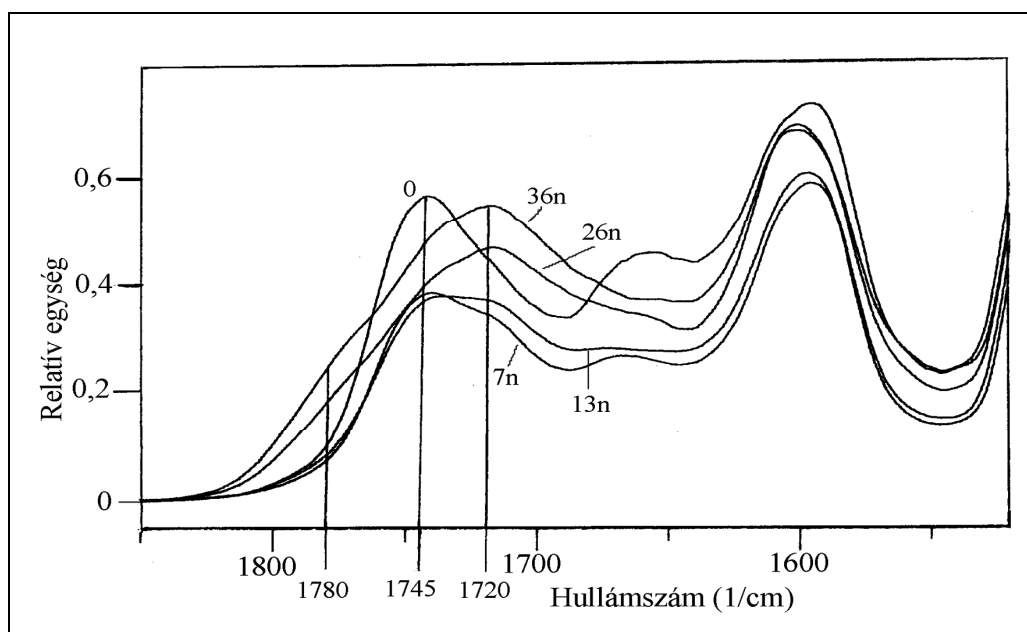


33. ábra Az erdei fenyő (P. s.), a lucfenyő (P. a.), a vörösfenyő (L. d.), a nyár (P. e.) és az akác (R. p.) faanyagok különbségi, infravörös színeképei 90°C-on történt, 36 napos gőzölés hatására

Ha megvizsgáljuk a karbonilsáv változásának időfüggését (A 34. ábrán a nyár mintákra vonatkozó mérési eredményeket prezentáljuk), akkor az 1745 cm^{-1} maximumú összetett sáv csökkenését figyelhetjük meg a gőzölés első időszakában. Hét napi kezelés után kezd növekedni egy sáv az 1720 cm^{-1} környékén, ez a sáv folyamatosan növekszik a kezelés további időtartama alatt. A 13 napos kezelés után egy másik sáv is növekedésnek indul 1780 cm^{-1} környékén. Ez a növekedés az abszorpciós színeképen csak mint egy váll látszik, de a különbségi színeképeken egyértelműen megjelenik.

A fent leírt összetett változások értelmezését adó publikációt adtak közre Németh és munkatársai 2003-ban. Akác és nyár (*Populus nigra*) famintákat vizsgáltak és a termikus kezelés hatását az infravörös színeképek felvételével követték. Vizsgálataikkal kimutatták, hogy mérsékelt hőmérsékletű ($\leq 200^\circ\text{C}$) termikus kezelés hatására a karbonilsávban

lejátszódó változások két szakaszra oszthatók. Megállapították, hogy a kezelés első szakaszában egy degradációs, a karbonil csoportok csökkenésével járó folyamat játszódik le, melyet egy oxidációs szakasz követ, melyben a karbonil csoportok száma nő. Azt is kimutatták, hogy érvényesül a hőmérséklet-idő szuperpozíció. A mi eredményeink azt mutatják, hogy ezek az új karbonilcsoportok legalább kétféle oxidációs folyamat eredményei és keletkezésüknél időbeli eltolódás mutatkozik.



34. ábra A nyár faanyag K-M függvényének módosulása a gőzölési idő (0-36 nap) függvényében 90°C-on történt gőzöléskor

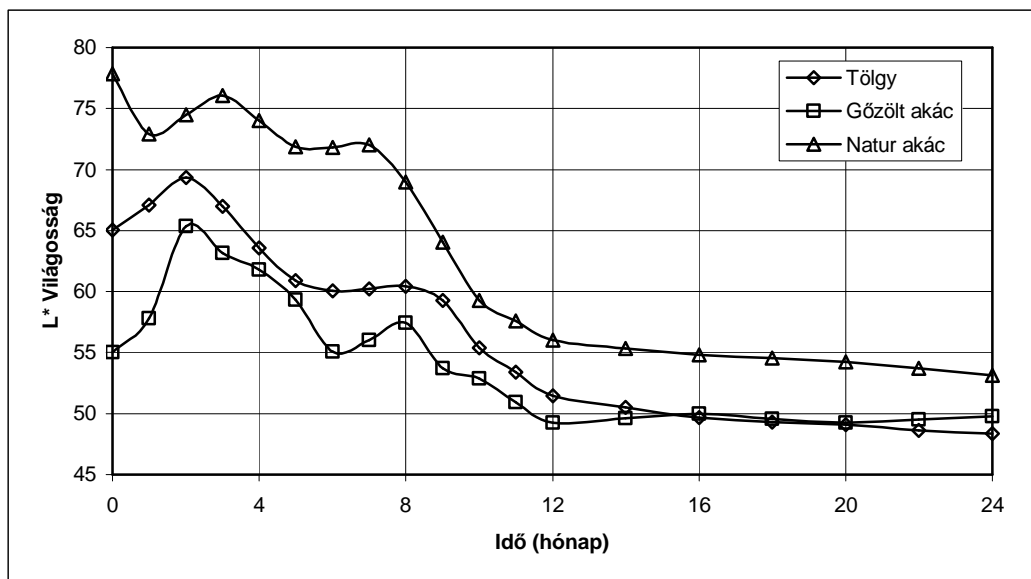
A harmadik terület, ahol az IR színekép változást mutatott az 1040-1120 cm^{-1} közötti hullámszám tartomány, mely a C-O és C-O-C kötések abszorpciós tartománya. Az itt látható nagymértékű abszorpció-növekedés valódisága azonban kétséges. A faanyagok vizsgálatához széles körben alkalmazott Kubelka-Munk elmélet alkalmazhatóságát megkérdőjelezi az itt tapasztalható erős abszorpciója a faanyagoknak. Ezzel a problémával a 4.2.5. fejezetben foglalkozunk részletesen.

Összefoglalásként megállapíthatjuk, hogy a 90°C-on történő termikus kezelésnél mind a színváltozásban, mind az infravörös színeképben jelentős eltérések mutatkoztak az abszolút száraz és a nedves körülmények között kezelt faanyagoknál. A víz jelenlétének tehát meghatározó szerepe van a faanyagok termikus kezelésénél. Nedves légtérben a színeképző vegyületek könnyebben hidrolizálódnak, majd oxidálódnak, kialakítva a gőzölt faanyag színét. Az akác faanyagnak a többi faanyagtól eltérő viselkedése a magas

extraktanyag-tartalmával magyarázható, ami a tartósságának egyik záloga. A hazai fafajok között az akácnak van a legnagyobb extraktanyag tartalma.

4.1.6. A gőzölt akác faanyag időjárás-állóságának vizsgálata

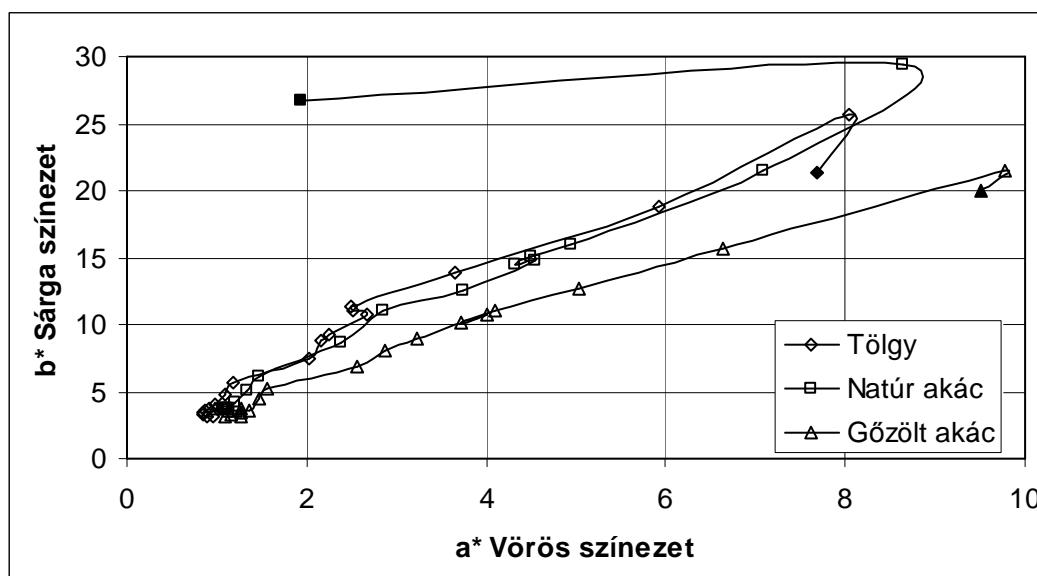
A vizsgálatokhoz az összehasonlítás érdekében a gőzölt akác minták mellé natúr akác mintákat is tettünk, és elhelyeztünk tölgy mintákat is, mivel a tölgy faanyag kiváló időjárás-állósága jól ismert. Az időjárás hatásának kitett faminták közül a világos színű natúr akác sötétedett a lényegesen sötétebb tölgy és gőzölt akác viszont világosodott az első hónapban, a többnyire napos augusztus során (35. ábra). Szeptemberben és októberben a natúr akác is világosodott, miközben a sötétedést okozó degradációs termékeket az eső kimosta a felületből. Ezt követően valamennyi minta sötétedett. Ez alól a 7. és a 8. hónap volt a kivétel, ahol a világosság változása stagnált a gőzölt akác kivételével. Az első év alatt megtörtént a világosság csökkenésének döntő része. A második évben alig történt változás. A gőzölt akác a napsugárzás hatására bekövetkezett világosság növekedés után közel került a tölgy világosságához, és a további kezelés során gyakorlatilag együtt haladtak.



35. ábra Az időjárás hatásának kitett minták világosság-változásának időfüggése

A napsugárzás által létrehozott fotodegradáció tekintetében a színezet változása sokkal jellemzőbb, mint a világosság változása. A lignin bomlásának következményeként a sárga irányú eltolódás a jellemző. A kitettség első hónapjában valamennyi mintánál megfigyelhető volt kismértékű sárgulás (36. ábra). Ezen idő alatt a natúr akác minták nagymértékű vörös irányú színezet eltolódást mutattak. Az akác faanyag nagyon magas extraktanyag tartalma okozza ezt az erőteljes elszíneződést. A gőzölt akácnál ez a

változás már a gőzölés során végbemegy, ezért itt csak csekély vörös irányú eltolódást észlelünk. Szeptembertől a gyakoribbá váló esők folyamatosan mosták ki a színeképző anyagokat valamennyi mintából, függetlenül attól, hogy mikor és milyen folyamatban keletkeztek azok. Mind a vörös színezet, mind a sárga színezet folyamatosan csökkent. Ez alól csak a téli hónapok voltak a kivételek, amikor alig történt színezetváltozás. A kitettség első 12 hónapja során szinte az összes színeképző vegyület degradálódott és kimosódott a minták felszínéből. A kitettség második éve során már nem történt lényeges színezetváltozás. Két év után a próbatestek színe alapján nem lehetett eldönteni, hogy eredetileg melyik sorozathoz tartoztak. Valamennyi minta színe egyformán szürke volt mutatva, hogy a felszínen csupán a szürke cellulóz láncok maradtak. Szinte minden más alkotóvegyület degradálódott. A minták szabad szemmel érzékelhető szürke voltát a színmérés is jól visszaadja, hiszen az a^* és b^* koordináták nagyon kicsi értékek, ami éppen a szürke szín jellemzője.



36.ábra A színpontok vándorlása a kitettség hatására (A görbék fekete kezdőpontjai a kezeletlen minták színpontjai, és ezeket követik a havonta, a második évben kéthavonta mért színpontok.)

Összefoglalásként megállapíthatjuk, hogy a színtartósság tekintetében a natúr akác színe, a napsugárzás hatására bekövetkező jelenős vörös elszíneződés után, a szabad térben gyakran alkalmazott tölgyhöz hasonlóan viselkedett. A gőzölés viszont, mint színváltoztató hatás nem javasolható a szabadtérbe kitett fatárgyak esetében, mert az általa létrehozott szín nem időjárásálló. Azért sem célszerű a gőzölt akác kültéri felhasználása, mert a gőzölés csökkenti a natúr akác kiváló gombaállóságát (Molnár és munkatársai 1998).

4.2. Fotodegradációs vizsgálatok

A szabadban, az időjárás hatásának kitett faanyagokat sok komponensből összetett degradációs folyamat-láncolat éri. Ezen hatások közül a napsugárzás, annak is az UV tartománya okozza a primer károsítást. Ezt követi az esővíz illetve a levegő páratartalmának hatása, mely kimossa a degradációs termékeket a felszínből. Ezzel teret nyit a napsugárzás károsító hatásának a következő rétegben. Ezen két folyamat megkönnyíti a faanyagot lebontó gombák behatolását is. Mindezek hatására a faanyag elveszíti kellemes színét és elszürkül. Megnövekszik a felületi érdesség, de a felületi réteg szilárdsága is jelentősen csökken (Derbyshire és munkatársai 1995, 1996, 1997.).

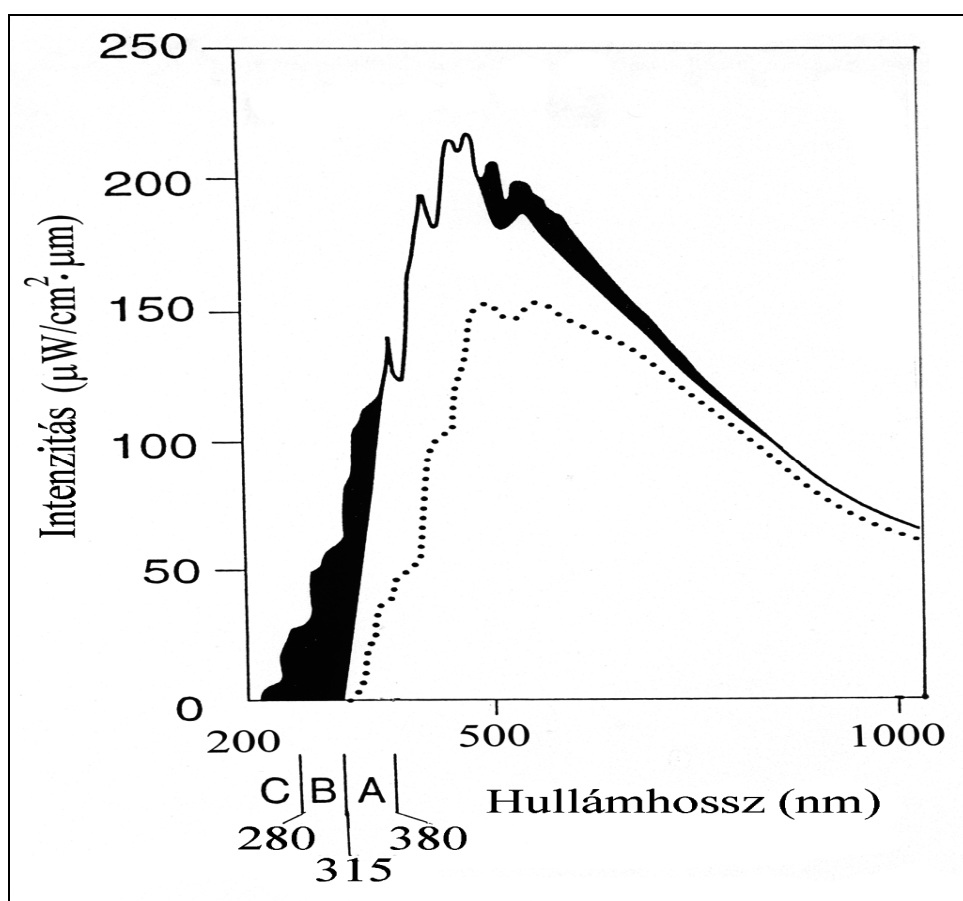
A sokéves kitettség hatását jól szemlélteti az 7. kép, mely egy japán templom, időjárás viszontagságaiknak kitett egyik tartóoszlopát mutatja. A fényképen jól látszik, hogy a faanyag különböző szöveteinek az ellenálló képessége milyen nagymértékben eltér egymástól. Részletesen meg kell tehát vizsgálni a geszt és a szijács korai és késői pásztájának a degradációs tulajdonságait. Emellett ez a jelenség fokozott mérés-technikai odafigyelést is igényel, hiszen a kezelések hatásának mérésekor a kezelés előtt és után pontosan ugyanazon a helyen kell a mérést elvégezni.

Az ultraibolya fény hatására a faanyag felszínén bekövetkező kémiai változásokat az infravörös abszorpciós színek felvételével lehet nyomon követni. A faanyag erősen abszorbeálja a fényt, ezért az abszorpciós színek hagyományos (átvilágítással történő) felvétele a faanyag esetében nem lehetséges. A felület által diffúz módon reflektált fény intenzitásából lehet következtetni az abszorpció mértékére a Kubelka-Munk elmélet segítségével. Szerencsés összhang van abban, hogy a diffúz módon reflektált fény éppen abból a felszíni rétegből hoz információt, ahol a fénybesugárzásra végbemenő fotodegradáció történik. Gondot jelent, hogy a Kubelka-Munk elméletet gyengén abszorbeáló anyagok vizsgálatára dolgozták ki. Ezért meg kell vizsgálni, hogy az elmélet alkalmazásának mik a korlátai.

A faanyag infravörös színe a benne található sokféle kémiai csoport miatt rendkívül összetett (38. ábra felső függvénye), az egymást átfedő abszorpciós sávok sokaságából áll. Ezért a változások valódi helye és mértéke csak pontatlanul határozható meg, sok esetben észre sem vehető. Szükséges egy olyan módszer kidolgozása, melyik csak a színek változását jeleníti meg.

A napsugárzás degradációs hatásának reprodukálható vizsgálata a szabadba kitett próbatesteken sok nehézségbe ütközik, hiszen a sugárzás intenzitása és hullámhosszának

összetétele, spektruma egy földi nap folyamán folyamatosan változik, de a Nap állásának változásával, éves periódussal szintén változik. A fenti paramétereket jelentősen befolyásolja a levegő páratartalma is. Napjainkban a Föld ózonrétege vastagságának a csökkenése is módosítja a szabadban lévő faanyagokat érő sugárzást, melyet a Nap színeke szemléltet (37. ábra). Ráadásul az ózonréteg vékonyodásával az UV sugárzás intenzitása erősödik, és megjelenik az UV-B tartomány, erősebb degradáló képességgel. A fenti problémákra tekintettel a fotodegradációs vizsgálatokat rendszerint mesterséges fényforrásokkal végzik el. Itt a körülmények jól ismételhetők, és a paraméterek állandó értéken tarthatók. Fontos kérdés azonban, hogy az alkalmazott fényforrás színeke hogyan viszonyul a napsugárzás színekéhez. Az is fontos kérdés, hogyan határozható meg az ekvivalencia a mesterséges és a természetes fotodegradáció között.



37. ábra A Nap emissziós színeke. A fekete tartományokat az ózonréteg kiszűri. A pontozott vonal a talajszinten mérhető intenzitás-eloszlást reprezentálja (Häckel 1999)

A továbbiakban az összetett fotodegradációs folyamatnak a fent említett részfolyamataival, és az ezek meghatározásához szükséges vizsgálati módszerek pontosításával, kiegészítésével foglalkozunk.

4.2.1. A fotodegradáció során bekövetkező változások követése az infravörös különbségi színekép segítségével

Az infravörös színekép felvétele az egyik leggyakrabban alkalmazott módszer a fotodegradáció által létrehozott kémiai változások követésére. A mai modern technika lehetővé teszi a rendkívül fényszegény diffúz módon reflektált fény detektálását. A számítógépek segítségével azonnal megkaphatjuk a mért adatokból a K-M függvényt, melyet a továbbiakban abszorpciós színeképként kezelünk. Ez nagy előny a korábbi káliumbromid-pasztillás eljárással szemben, hiszen a faanyag felületének éppen azon rétegéből kapjuk az információt, melyben a fotodegradáció történt. Erdeifenyő faanyag esetében a színekép alakját a 38. ábra felső függvénye szemlélteti, 300 W elektromos teljesítményű (Hanau F.R.G.) higanygőzlámpával történő 200 órás fénybesugárzás előtt és után. A színeképen legalább 20 sáv látható. A kémikusok szorgalmas munkával meghatározták az egyes elnyelési sávokhoz tartozó kémiai csoportokat (Hergert 1971, Fengel and Ludvig 1991, Faix 1991, Collier et al. 1992, Faix and Böttcher 1992), melyeket a 2. táblázatban adunk közre. Az egyes sávok helye a különböző fafajoknál kis mértékben eltér egymástól.

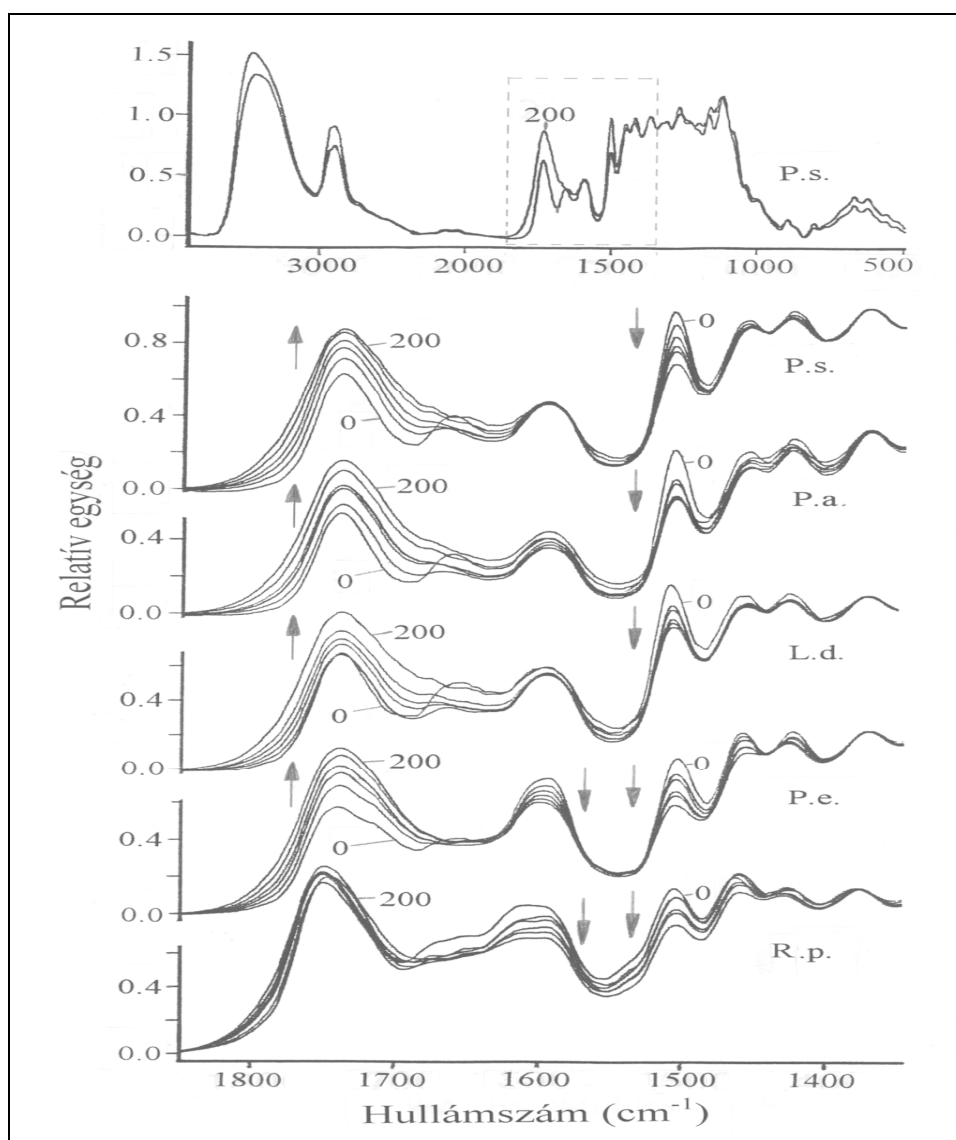
2. táblázat Az abszorpciós sávok azonosító adatai akác faanyag esetében

Hullámszám (cm ⁻¹)	Abszorpciós hely
3499	OH nyújtás
2937	CH,CH ₂ nyújtás (aszimmetrikus)
2908	CH,CH ₂ nyújtás (szimmetrikus)
1749	CO nyújtás a nemkonjugált keton-, acetyl-, carboxilcsoportoknál
1665	H ₂ O,CO nyújtás a konjugált rendszerekben
1599	aromás vázrezgés
1507	aromás vázrezgés
1465	C-H deformáció (aszimmetrikus)
1428	C-H deformáció (aszimmetrikus)
1380	C-H deformáció (szimmetrikus)
1337	C-H deformáció,C-OH nyújtás
1273	C _{aryl} -O, guajcil gyűrűrezgés CO nyújtással
1172	C-O-C nyújtás (aszimmetrikus)
1137	C-O-C nyújtás (szimmetrikus), aromás C-H
994	C _{alkil} -O
900	C-H cellulóz deformációk

A faanyag fő alkotó vegyületeinek, a cellulóznak, poliózoknak és a ligninnek a szerkezete nagyon összetett. Ezért nem meglepő, hogy a faanyag infravörös színeképe egymásra rakódott sávok sokaságából áll. Különösen igaz ez az $1000\text{-}1800\text{ cm}^{-1}$ tartományra, melyet találó elnevezéssel újlenyomat tartománynak nevezünk. Ha változás történik a kémiai szerkezetben, akkor a megfelelő sávok intenzitása növekszik vagy csökken annak megfelelően, hogy az ott abszorbeáló kémiai csoportok száma növekedett vagy csökkent a változás során. A 300 W elektromos teljesítményű higanygőz lámpával történő besugárzás hatására létrejövő színeképváltozást részletesen mutatja a 38. ábra alsó 5 részábrája erdei fenyő, lucfenyő, vörösfenyő, nyár és akác szíjácsának korai pásztaja esetében, az $1400\text{-}1800\text{ cm}^{-1}$ hullámszám tartományra vonatkozóan. (Ez a fényforrás döntő mértékben UV fényt bocsát ki, amint a 2. kép szemléltet.) A markáns változások az $1500\text{-}1800\text{ cm}^{-1}$ hullámszám tartományban történtek, ezért ezen a tartományon mutatjuk be a különbségi színekép meghatározásának jelentőségét.

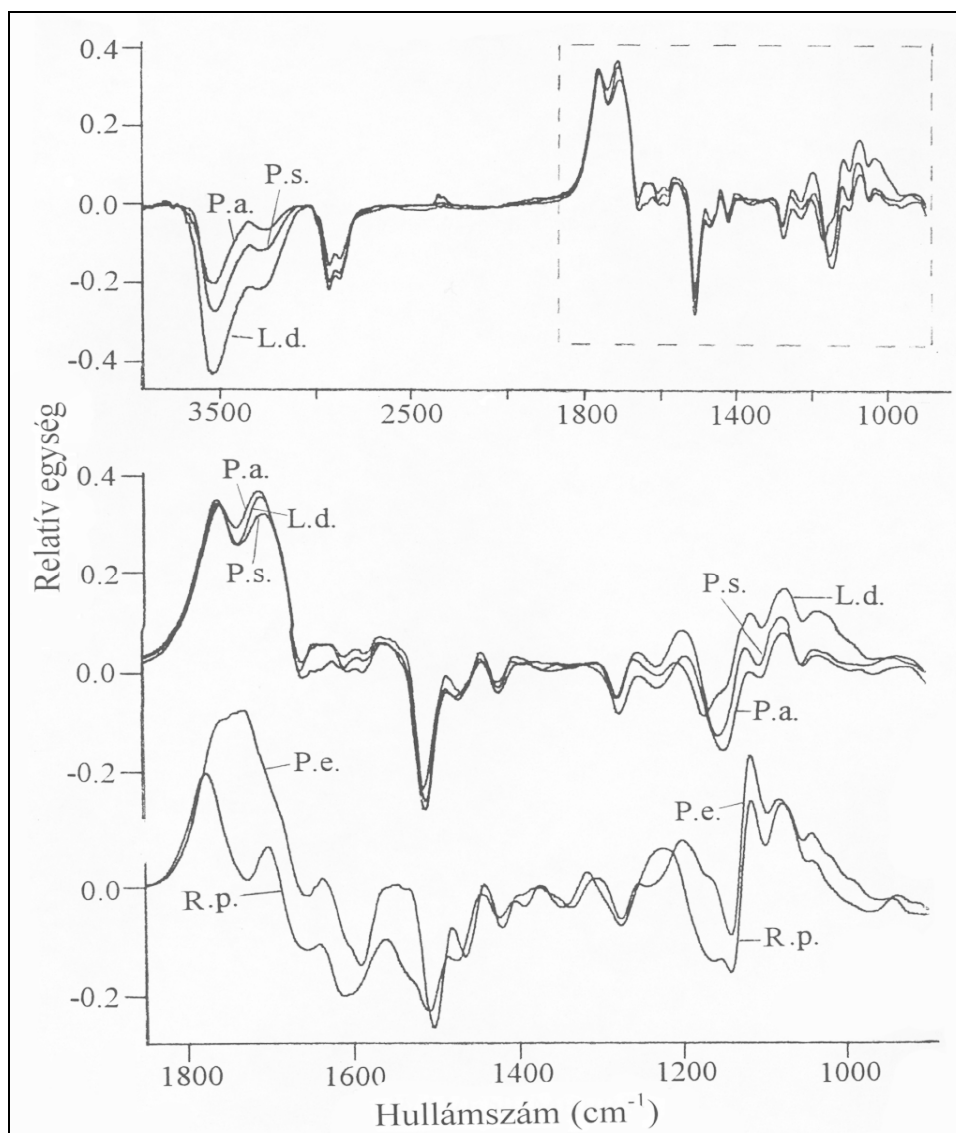
Az egyik változás a lignin aromás gyűrűjének degradációjából következő abszorpció-csökkenés az 1510 cm^{-1} hullámszám környezetében. A lombhullató fafajoknál az 1600 cm^{-1} környéki csökkenést ugyanez a kémiai változás okozza. A másik változás a színeképben a nemkonjugált helyzetű karbonil csoportok széles sávjában történő abszorpció-növekedés az 1745 cm^{-1} körüli maximummal. Első ránézésre azt mondhatjuk (38. ábra), hogy ez az egész sáv folyamatosan növekszik a besugárzás során. Nagyon alaposan megvizsgálva a változásokat azt látjuk, hogy a maximum két oldalán legalább olyan mértékű a változás, mint a maximumnál. A szakirodalomban nagyon sok publikáció foglalkozik ennek a sávnak a változásával, de szinte mindegyik csak a maximum körüli változást említi, nem foglalkoznak a két oldalsó változással (Hon és Chang 1984, Dirckx és munkatársai 1987/a, 1987/b, Németh és Faix 1994, Horn és munkatársai 1994, Pandey és Theagarajan 1997, Pandey és Khali 1998, Kataoka és Kiguchi 2001 Ohkoshi 2002, Müller és munkatársai 2003, Sudiyani és munkatársai 2003).

Azt is megfigyelhetjük, hogy az akác faanyag abszorpciójában lényegesen kisebb változások történtek, mint a többi faanyag esetében. Ez az eredmény alátámasztja azt a régi tapasztalatot, hogy az akác az egyik legellenállóbb faanyag a fotodegradációval szemben. A vörösfenyőről is köztudott a jó ellenálló képessége. Ezt az alábbi grafikon nem mutatja. Tapasztalataink alapján csak a késői pászta ellenálló képessége kimagasló, de az is csak akkor, ha kellően sötét színű.



38. ábra Fönt: Erdei fenyő infravörös szíképe besugárzás előtt (0) és 200 órás ultraibolya besugárzás után. Alatta: A kinagyított részek a 0; 10; 25; 50; 100; és 200 órás besugárzások utáni szíképekkel együtt erdei fenyő (Ps), lucfenyő (Pa), vörösfenyő (Ld), nyár (Pe) és akác (Rp) esetében.

Elkészítve a 38 ábrán látható változásokat szemléltető különbségi szíképeket (39 ábra), máris látjuk a módszer egyik nagy előnyét. A nagyon sok sáv közül csak azok jelennek meg, amelyekben változás történt. Így az egyes sávok valódi helye is jobban látható. A 39 ábra felső harmadában a tűlevelű faanyagok 200 órás besugárzás hatására bekövetkező abszorpció-változását látjuk a vizsgált teljes hullámszám tartományban. Az újlennyomat tartományban, az extrém összetettség ellenére, jól kirajzolódnak a változások. (Az ábra alsó része ezeket kinagyítva mutatja a lombhullató fafajokra is.) Elvileg ezeket a változásokat kellene látnunk a 38. ábrán is. A két ábra összehasonlítása jól szemlélteti a különbségi szíkép előnyeit.



39. ábra A 38. ábra adataiból készült különbségi színekpek (kezelt – kezeletlen) 200 órás higanygőzlámpás besugárzás esetén

A hidroxilcsoportok széles sávjában $3100\text{--}3600\text{ cm}^{-1}$ között két sáv csökkenését is megfigyelhetjük. A 38. ábráról viszont nem lehet megállapítani, hogy két sáv intenzitása is csökkent. A következő változás a metilcsoportok sávjában látható 2940 cm^{-1} hullámszám környékén. Ezt a sávot a korábbi publikációk stabilnak írták le a fotodegradációval szemben (Forsskåhl és Janson 1992). Ezért az 1995-ben közölt publikációnkban (Tolvaj és Faix 1995) az itt látható csökkenést mérési hibának valószínűsítettük. A Később lézeres vizsgálatokkal sikerült tisztáznunk a metilcsoportok sávjának viselkedését (4.2.3. fejezet). A nem konjugált karbonilcsoportok sávjában ($1690\text{--}1800\text{ cm}^{-1}$) a fenyőfélénél két jól elkülönülő sáv növekedését figyelhetjük meg 1710 és 1760 cm^{-1} környékén. A különbségi színekép jól mutatja, hogy a valódi

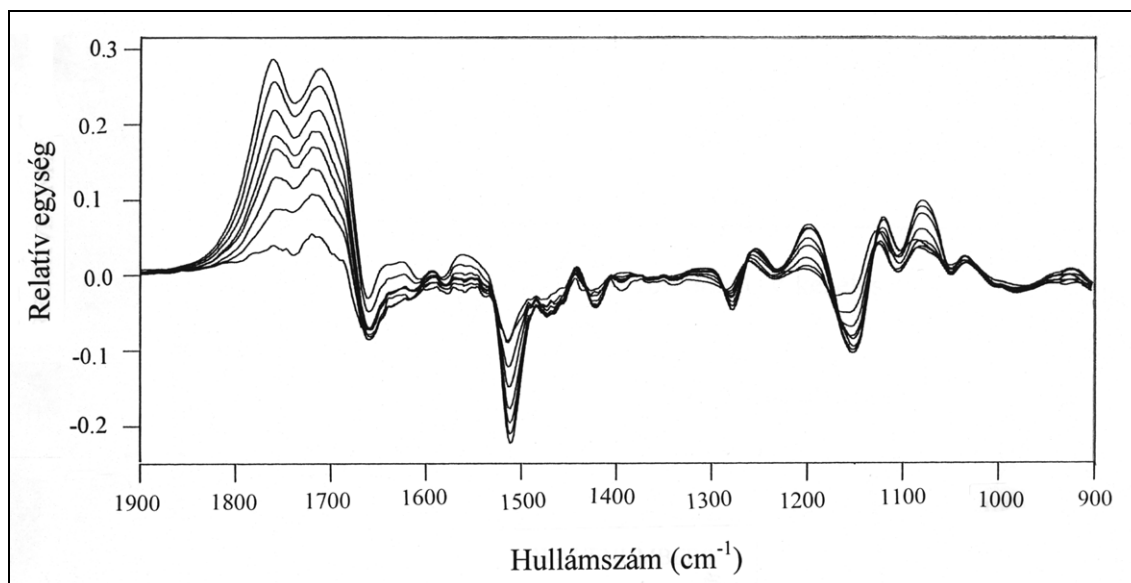
növekedés nem az 1745 cm^{-1} -nél történik, amint azt a publikációk többsége említi (hivatkozások az 58. oldalon). A nyár faanyagánál ez a két sáv közelebb kerül egymáshoz, de a jelenlétük itt is nyilvánvaló. Az akác esetében az 1710 cm^{-1} -nél lévő sáv lényegesen gyengébb, mint a másik, ezért az elkülönülésük jól érzékelhető. Ez a jelleg érvényes a többi kemény lombos fafajra is. A karbonil sávban végbemenő változások jól példázzák, hogy a különbségi színeképek mennyivel több információt hordoznak, mint a kezelt és a kezeletlen minták színeképeinek az egymásra illesztésével történő összehasonlítás.

Az 1510 cm^{-1} -nél lévő abszorpció-csökkenést a 38. és a 39. ábráról is problémamentesen leolvashatjuk, hiszen ez valóban egyetlen sáv változását reprezentálja. Az 1280 cm^{-1} környékén lévő abszorpció-csökkenés együtt jelentkezik az 1510 cm^{-1} -nél lévővel és a guajacil gyűrű abszorpciójaként azonosítható. Az $1100\text{--}1200\text{ cm}^{-1}$ tartományban abszorpció-csökkenés és növekedés egyaránt megfigyelhető, ami az éter kötések felszakadásával és más pozícióban lévők felépülésével magyarázható.

Annak oka, hogy a szakirodalomban alig találkozunk a különbségi színeképekkel abban keresendő, hogy ezek korrekt felvétele nagy szakmai tapasztalatot és a diffúz reflexió tulajdonságainak részletes ismeretét igényli. Ezek hiányában a különbségben megjelennek a faanyag inhomogenitásából, a fény reflexiójának irányfüggéséből és a felületi érdességből származó eltérések a vizsgálandó változások mellett. A nem kellő figyelemmel felvett különbségi színeképek ezért nem reprodukálhatók és értékelhetetlenek. Az általunk közreadott munkáknak egyik nagy erénye, hogy olyan vizsgálati módszert dolgoztunk ki, mellyel a fenti problémákat kiküszöböltük, és az utóbbi 10 évben sikeresen alkalmaztuk a publikált vizsgálatainknál. Néhány fontos vizsgálati szempontot a 4.2.2. és 4.2.5. fejezetekben adunk közre.

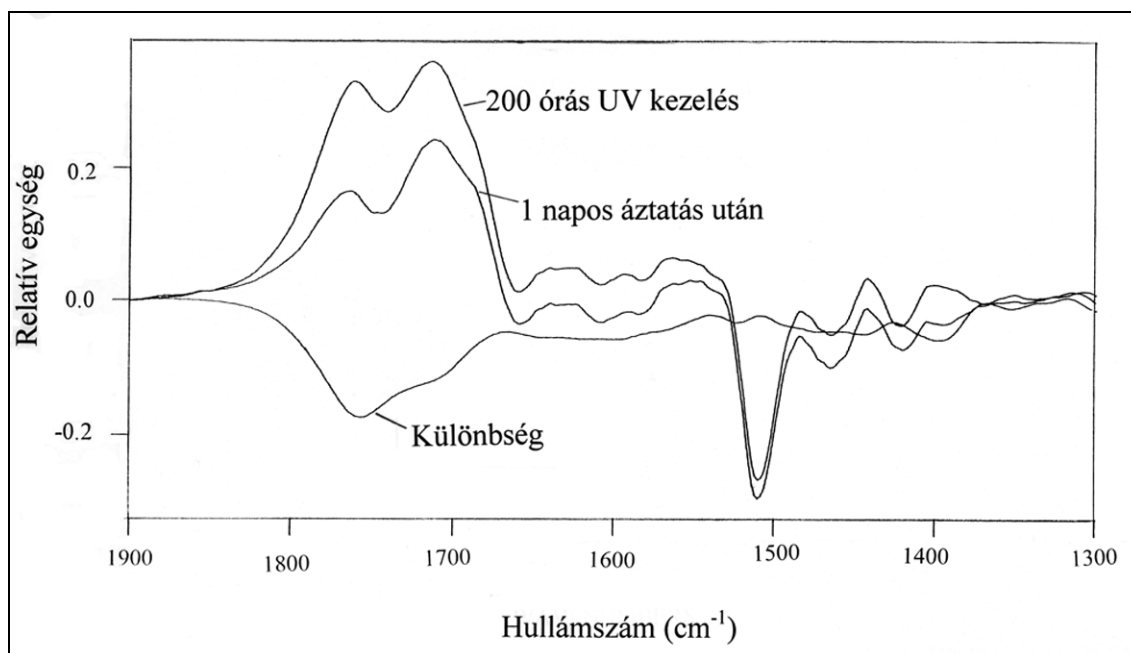
A korrekt módon meghatározott különbségi színeképek értékét, használhatóságát jól szemlélteti a 40. ábra, melyen az 5; 10; 17; 25; 35; 50; 70 és 100 órás higanygőz lámpával történt besugárzás hatását láthatjuk erdeifenyő szíjácsának korai pásztája esetében. Nem csupán a karbonil sáv abszorpció-változásának két sávra bomlását demonstrálja, hanem ezek időbeli növekedését is nyomon követhetjük.

Jól látható, hogy az 1710 cm^{-1} -es sáv korábban kezd el növekedni, de azt idővel megelőzi a később induló 1760 cm^{-1} -es sáv és 50 óra után már ez lesz intenzívebb. Ez az ábra a fotodegradációs folyamat energiafüggését is reprezentálja, hiszen a kezelési idő növekedésével arányosan növekszik a minta által elnyelt fényenergia is.



40. ábra Az erdei fenyő szijácsa, korai pásztájának különbségi színeképei 5; 10; 17; 25; 35; 50; 70 és 100 órás higanygőz lámpával történt besugárzás után

A szabad ég alatt lévő faszerkezetek esetében az esővíz hatásával is számolni kell. Ennek imitálására a 200 órás fénybesugárzásnak kitett próbatesteket 24 óráig desztillált vízben áztattuk. Vákuumszárítás után felvettük a diffúz reflexiós, infravörös színeképüket. A különbségi színeképeket a 41. ábra mutatja, demonstrálva a degradációs termékek kimosódását. A fotodegradáció során keletkezett, nem konjugált karbonilcsoportokat a



41. ábra A lucfenyő korai pásztájának különbségi színeképei 200 órás UV kezelés és az azt követő 24 órás áztatás után

víz részben kimossa. A 1760 cm^{-1} -nél abszorbeálókból több kimosódik, mint az 1710 cm^{-1} -nél abszorbeálókból. Ugyanez látható a kimosódást megadó (negatív) különbségi színeképen is, amelyik csak a kimosódás hatására bekövetkező változásokat szemlélteti. Ez a függvény bizonyítja, hogy a nem degradálódott lignint a víz érintetlenül hagyja, hiszen 1510 cm^{-1} -nél nem történt változás. Az UV kezelés okozta különbségi színeképen egy váll látható 1685 cm^{-1} környékén. Ez a váll markánsabbá válik a vizes kioldás után. Ennek alapján fel kell tételeznünk, hogy a fotodegradáció egy eddig nem említett további sáv abszorpciójának növekedését eredményezi 1685 cm^{-1} környékén. Az is látszik, hogy a vízzel történő kimosás ezt a fotodegradációs terméket érintetlenül hagyja.

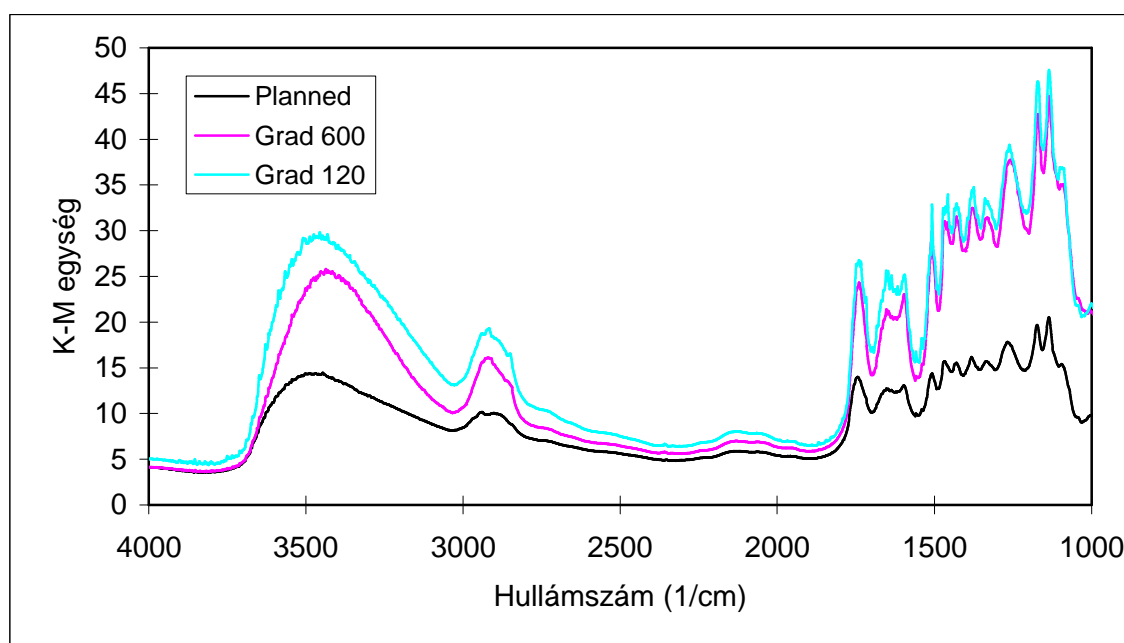
Az eredmények összefoglalásaként megállapítottuk:

A fotodegradáció hatására létrejövő nem konjugált helyzetű karbonilcsoportok 1745 cm^{-1} hullámszám környéki abszorpciónövekedése legalább két sávból tevődik össze. Eleinte az 1710 cm^{-1} körüli sáv növekszik erőteljesebben, de a besugárzási idő növelésével azt megelőzi az 1760 cm^{-1} hullámszám körüli sáv növekedése. Feltártuk, hogy a víz kimossa a faanyag felszínéről a fotodegradáció során keletkezett karbonilcsoportokat tartalmazó vegyületek egy részét. Az 1760 cm^{-1} hullámszám környékén abszorbeálók nagyobb mértékben kioldhatók, mint az 1710 cm^{-1} környékén abszorbeálók.

4.2.2. A diffúz reflexióval mért infravörös színekép függése a felület tulajdonságaitól

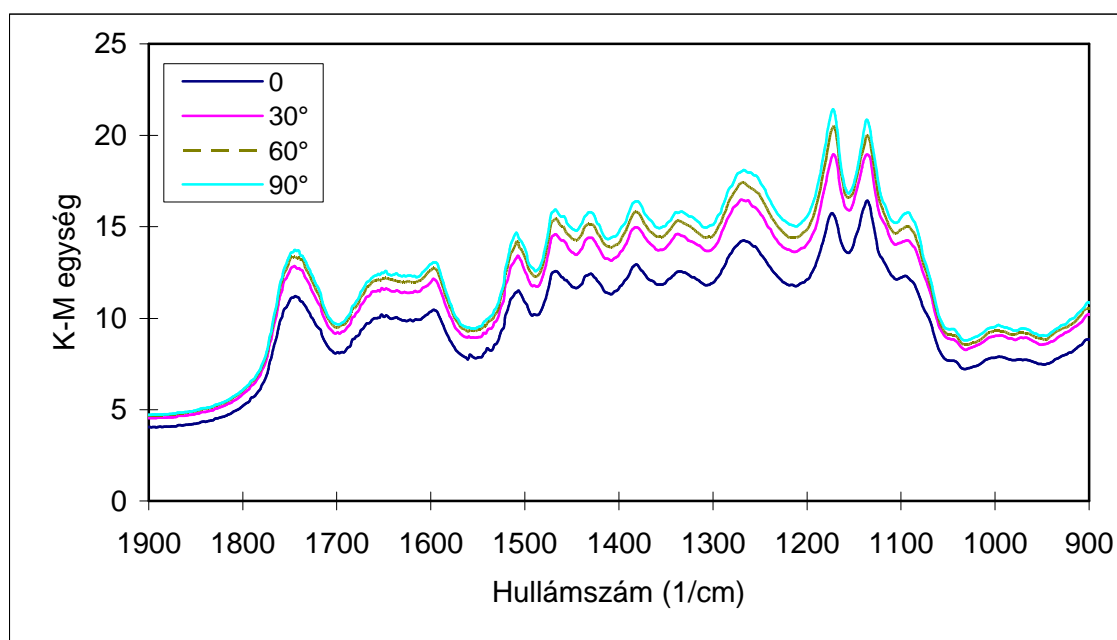
A felületi tulajdonságok közül az érdesség befolyásolja a felület fényszórását, és ezen keresztül a K-M függvényt is. Faix és Böttcher (1992) kimutatta, hogy káliumbromid porba kevert faporok diffúz reflexiós infravörös spektruma függ a részecskemérettől és annak koncentrációjától, faminták esetében pedig a felületi érdességtől. Vizsgálataink szerint nem a függvény alakja hanem az intenzitások nagysága függ a felületi érdességtől. Ezt szemlélteti a 42. ábra, ahol bükk faanyag korai pásztájának K-M függvényét ábrázoltuk gyalult és 600-as, valamint 120-as csiszolópapírral kialakított felszín esetében. (Az ebben az alfejezetben bemutatott K-M függvényeken nem végeztünk adatmanipulációt, alapvonal korrekciót, normálást.) A felületi érdesség növekedésével az intenzitások növekedtek, de a függvény alakja nem változott meg. A jelenség oka, hogy a K-M függvény az abszorpció és a szórás koefficiens hányadosát adja meg. Az érdesítéssel megnövelt felület fényreflexiója megváltozik, a detektor által összegyűjthető fotonok száma csökken, ami a K-M függvény értékeinek növekedését eredményezi. (A jelenséget részletesebben a 4.2.5. fejezetben tárgyaljuk.) Erre a jelenségre figyelni kell

ott, ahol a kezelés során a felületi érdesség megváltozik. Ebben az esetben a különbségi színekép nem határozható meg közvetlenül a kezelt és a kezeletlen állapot színeképének kivonásával. Ilyenkor a színeképen keresni kell egy olyan belső sávot, amelyikről tudjuk, hogy a kezelés során az intenzitása nem változott meg. Ennél a sávnál normálni kell mindkét színeképet, és a kivonást ezután lehet elvégezni. A normálás megszünteti a felületi érdességből származó eltéréseket. Ilyen eset fordul elő, ha a fotodegradáció kellően intenzív, vagy sokáig tart.



42. ábra A gyalult, a 600-as és a 120-as csiszolópapírral csiszolt felületű bükk faanyag infravörös színeképe

A felületi érdesség nemcsak a felület megmunkálásától függ, hanem a faanyag pórusosságától, illetve a különböző méretű pórusok eloszlásától is. A vizsgálatnál a megvilágítás iránya is figyelembe veendő, hiszen a felszínen átmetszett edények „látható” belső felülete függ a megvilágítás és a megfigyelés irányától (Tolvaj és Mitsui 2004). Sajnálatos módon a gyári infravörös spektrofotométerek esetében a fényutak szöge nem változtatható meg. A vizsgálatainknál alkalmazott infravörös fény 45° -os szög alatt érte a faanyag felületét. Csak arra volt lehetőségünk, hogy a minták forgatásával a beeső fénysugárnak a rostiránnyal bezárt szögét változtassuk. A mérések eredményét a 43. ábrán szemléltetjük gyalult felületű bükk faanyag esetében, illetve a 3 táblázatban foglaltuk össze a vizsgált faanyagokra vonatkozóan. A rostokra merőleges vizsgálatnál (90°) a K-M függvény értékei kissé nagyobbak, mint a párhuzamos (0°) esetben.



43. ábra A bükk faanyag infravörös színekének irányfüggése. (0° rostokkal párhuzamos, 90° rostokra merőleges vizsgálati irány)

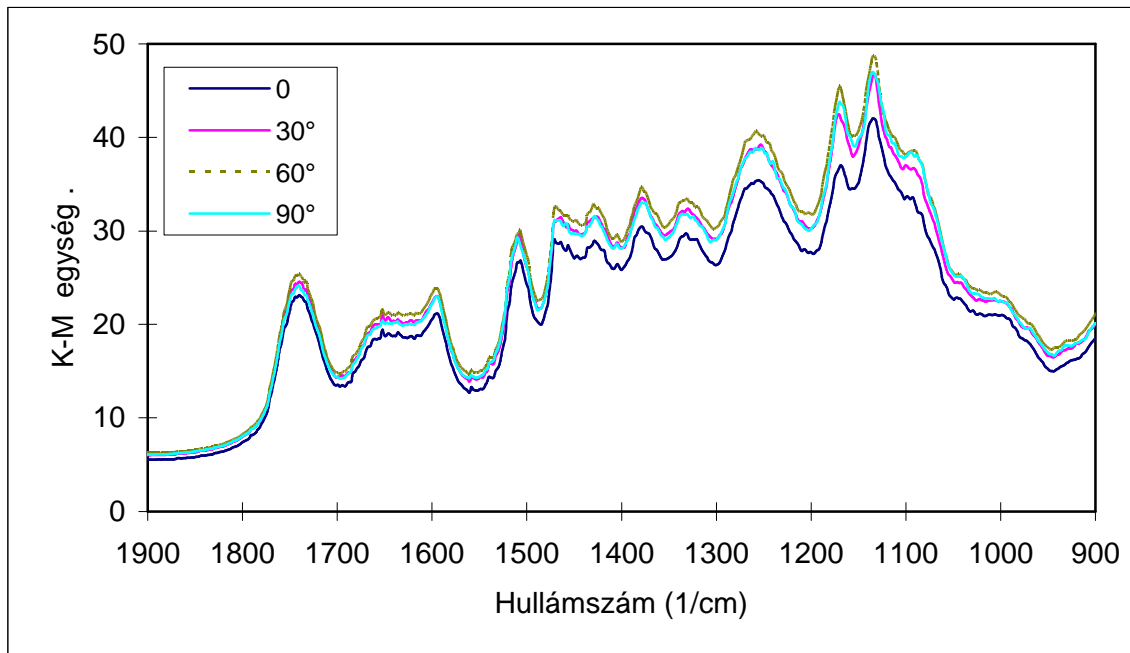
3. táblázat A vizsgált fafajok Infravörös sávjainak irányfüggése. (A második hullámszám-érték a viszonyítási pont hullámszáma)

Faj	Felület	Hullámszámok (1/cm)	0°	30°	60°	90°
			Relatív egység			
		1098/1382	0,90	0,89	0,88	0,88
Bambusz	Gyalult	1135/1382	1,22	1,23	1,21	1,20
		1176/1382	1,21	1,25	1,38	1,42
	Mikrotomolt	1176/1382	1,19	1,23	1,30	1,33
		1093/1381	0,95	0,95	0,95	0,96
Bükk	Gyalult	1135/1381	1,27	1,27	1,27	1,27
		1173/1381	1,22	1,26	1,29	1,31
	Mikrotomolt	1173/1381	1,04	1,11	1,24	1,26
		1094/1379	0,96	0,95	0,94	0,94
Tölgy	Gyalult	1136/1379	1,22	1,21	1,21	1,21
korai pászta		1172/1379	1,16	1,19	1,21	1,22
	Mikrotomolt	1172/1379	1,08	1,09	1,11	1,13
		1091/1382	0,85	0,85	0,86	0,86
Tölgy	Gyalult	1136/1382	1,29	1,27	1,24	1,22
késői pászta		1174/1382	1,20	1,27	1,40	1,46
	Mikrotomolt	1174/1382	1,08	1,14	1,28	1,34
		1085/1373	1,13	1,14	1,12	1,23
Japán ciprus	Gyalult	1128/1373	1,24	1,25	1,23	1,29
		1170/1373	1,08	1,18	1,34	1,42
	Mikrotomolt	1170/1373	0,96	1,17	1,30	1,40
		1094/1373	1,12	1,12	1,19	1,23
Álciprus	Gyalult	1131/1373	1,35	1,31	1,35	1,39
		1171/1373	1,21	1,30	1,34	1,39
	Mikrotomolt	1171/1373	1,28	1,35	1,44	1,50

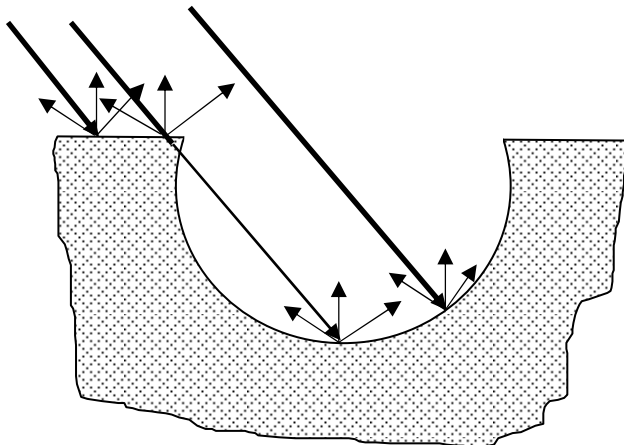
Az intenzitás a szög növelésével növekszik. Ez az intenzitás-növekedés az egész újlennyomat tartományban egyenletes volt. Elteréseket csupán az éter kötések 1070-1200 cm^{-1} sávjában tapasztaltunk. Ebben a tartományban 3 elkülönülő sáv található. 1090, 1130 és 1173 cm^{-1} körüli maximummal.

A fenyőféléknél egy további kis sáv is megfigyelhető 1115 cm^{-1} -es maximummal. A maximumok helye a különböző fafajoknál kissé eltér egymástól, az eltérő környezet befolyásoló hatása miatt. A pontos hullámszámok a 3. táblázatban találhatók. A korrekt összehasonlítás érdekében az egyes intenzitásokat az 1380 cm^{-1} -es hullámszám környéki maximum intenzitásához viszonyítottuk. Ezek a normált adatok találhatók a 3. táblázatban. A középben lévő sávok (1115 és 1130 cm^{-1}) intenzitásai nem mutattak irányfüggést. Kismértékű növekedés volt tapasztalható az 1090 cm^{-1} -es sávnál a fenyőfélék esetében, de ez csak a merőleges helyzetben volt észrevehető. Számottevő, tendenciózus változást az 1173 cm^{-1} környéki sávnál figyelhettünk meg. A sáv intenzitása a szög növekedésével fokozatosan növekedett, és a merőleges helyzetben volt a legmagasabb valamennyi vizsgált faanyag esetében. Ezt az irányfüggést csökkenteni lehetett a felület érdesítésével. A 44. ábra a 600-as csiszolópapírral érdesített bükk faanyag K-M függvényének irányfüggését ábrázolja. Itt is megjelenik az 1173 cm^{-1} -es sáv irányfüggése, de itt ez a függés lényegesen szerényebb, mint a gyalult felület esetében.

A jelenség magyarázata a faanyag sejtszerkezetében keresendő (Tolvaj és Mitsui 2004). A megmunkálásnál kettévágott sejtfal keskeny széle részben átjárható a fény számára, ezt a 45. ábra szemlélteti. Ezek a fénysugarak nagyobb mértékű abszorpciót szenvednek, mint a felületről visszaverődők. Ezeknek a keskeny sejtfalvégeknek a felülete lényegesen nagyobb a rostokkal merőleges irányban, mint a párhuzamos irányban, a vizsgálatoknál beeső fény nézőpontjából nézve. További szempont, hogy a tangenciális metszetű felületnél a beeső fény különböző arányban „látja” az átmetszett sejtfal és a sejtüreg felületét a rostiránnyal párhuzamos és arra merőleges megvilágításnál. (A beeső fény a gyári beállítás szerint 45°-os szöget zárt be a felület normálisával, ezért számára a sejtüregnek csak egy része volt látható merőleges helyzetben, de majdnem az egész látható párhuzamos helyzetben.) Ezért a megvilágítás szempontjából a felület sejtfal/sejtüreg aránya nagyobb merőleges helyzetben, mint párhuzamos helyzetben.



44. ábra A 600-as csiszolópapírral csiszolt felületű bükk faanyag színképének irányfüggése



45. ábra Az átmetszett sejtfa reflexiós és transzmissziós tulajdonságai

Az 1173 cm^{-1} -es sávhoz tartozó éter kötések döntő része a cellulózban és a poliózokban található, amelyek a sejtfa fő alkotó elemei. Ezzel ellentétben a sejtüreg belső fala elsősorban lignint tartalmaz. Az itt található szemölcsök is jórészt ligninből épülnek fel, hiszen a sejtek lignifikálódása során keletkeznek.

A fenti értelmezést megerősíti a tölgy korai és késői pásztájának eltérő viselkedése. A nagy edényeket tartalmazó korai pászta esetében az üregekhez képest relatíve kevesebb sejtfalet tartalmaz a tangenciális metszeten, mint a késői pászta. Ezért az 1173 cm^{-1} -es sáv irányfüggésének a korai pászta esetében kisebbnek kell lennie, mint késői pásztánál.

A 2. táblázat adatai ezt megerősítik. A csiszolópapírral érdesített felületnél az átvágott sejtüregek keskeny élei jórészt eltűnnek, ezért a csiszolt felületeknél az irányfüggés minimális (44 ábra). A mikrotommal metszett felületeknél viszont a kulcsszerepet játszó élek még a gyalult felületekénél is élesebbek és épebbek lesznek, megnövelve az irányfüggést. Ez a viselkedés is kiolvasható a 3. táblázatból.

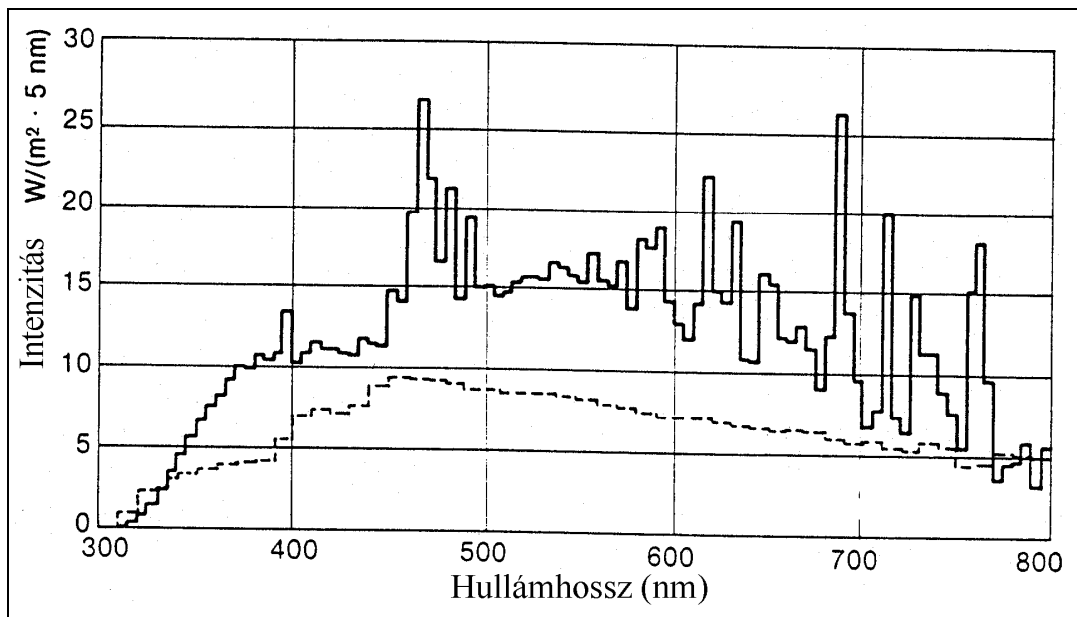
A diffúz reflexió segítségével felvett infravörös színeképek kiértékelésekor a fent leírt irányfüggésre tekintettel kell lenni. Különösen figyelni kell rá, ha különbségi színeképeket készítünk. Ilyenkor a mintákat a kezelés előtt és után is pontosan ugyanabban a pozícióban kell betenni a készülék mintatartójába. Ellenkező esetben a kezelés okozta változáshoz hozzámérjük az irányfüggést is.

4.2.3. A napsugárzás mesterséges fényforrásokkal történő imitálásának problémái

Az időjárás hatásának kitett faanyagok degradációja sok komponensből álló folyamat. A különféle behatások közül a napsugárzásé a meghatározó szerep, különösen a degradáció kezdetén. A napfény spektrumából az ultraibolya fény fotonjainak energiája elegendő az egyes kémiai kötések felszakításához. A napsugárzás hatásának egzakt vizsgálata a szabadba kitett mintákkal sok nehézségbe ütközik, és szinte lehetetlen elválasztani a többi hatástól (pl. eső, levegő páratartalmának változása). Ráadásul a napsugárzás intenzitása szezonálisan és egy napon belül is nagyon sokat változik. Az intenzitását befolyásolja továbbá a felhőzet és a levegő páratartalma. Ezért a kitettségi vizsgálatok nem jól reprodukálhatók. A napsugárzás imitálására mesterséges fényforrásokat használunk. Ezek esetében a vizsgálati körülmények előre tervezhetők és reprodukálhatók. A mesterséges fényforrások alkalmazása viszont azt a kérdést veti föl, hogy ezek a fényforrások mennyire alkalmasak a napsugárzás imitálására, illetve hogyan határozható meg az időekvivalencia a természetes és a mesterséges besugárzás között.

Annak eldöntésére, hogy egy fényforrás alkalmas-e a napsugárzás imitálására, a fényforrás emissziós színeképét kell összehasonlítani a napsugárzás földfelszínre elérő részének spektrumával, melyet a 37. ábra mutat be. A vizsgálatoknál használt fényforrások közül a xenonlámpa színeképe áll legközelebb a napéhoz. Az általunk használt egyik xenonlámpa emissziós színeképét a 46. ábra szemlélteti. Az egyetlen lényeges eltérés a napsugárzáshoz képest, hogy a föld felszínét elérő napsugárzás színeképe jobban benyúlik az ultraibolya tartományba, mint a xenonlámpáé. Tovább rontja az ekvivalenciát, hogy az ózonréteg vékonyodásával az UV-B tartományból is egyre több eléri a talajszintet. Ezért a xenonlámpa egyre kevésbé lesz alkalmas a

napsugárzás hatásának imitálására, hiszen éppen a legnagyobb degradációt előidéző rövid hullámhosszak hiányoznak belőle. Ezért vizsgálatainknál a xenonlámpák mellett higanygőzlámpákkal is végeztünk besugárzásokat. Ezeknek a lámpáknak hátrányos tulajdonsága, hogy az UV-B mellet az UV-C tartományban olyan hullámhosszakon is sugároznak, melyek nem találhatók meg a napsugárzásban. Sajnálatos módon a fényforrások emissziójának intenzitását nem állt módunkban változtatni.

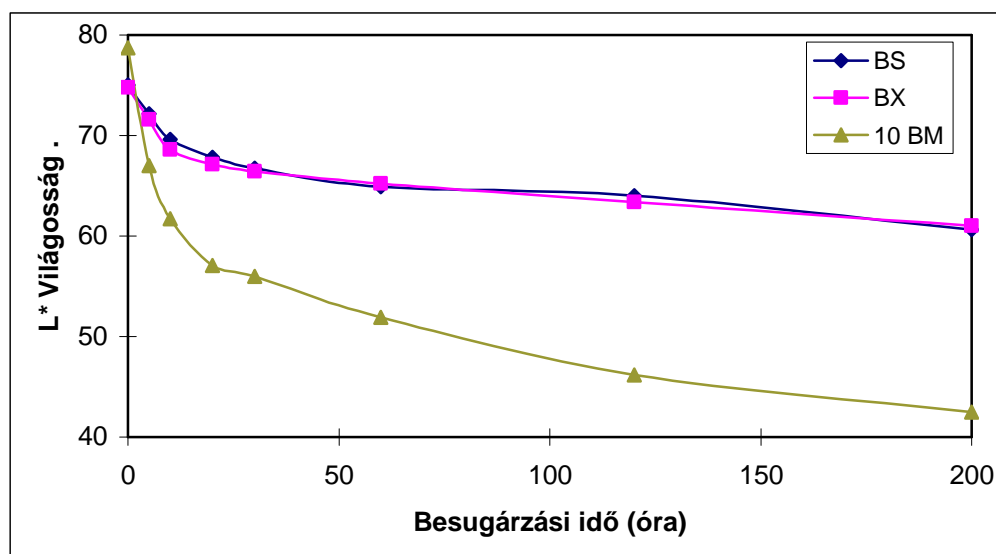


46. ábra A xenonlámpa emissziós színeképe (A szaggatott vonal a D65 fényforrás színeképe)

A higanygőzlámpával történő besugárzásnál a kezelési időket a többi vizsgálatéhoz képest tizedére kellett csökkenteni, de még így is a többinél nagyobb változásokat produkált.

A napsugárzás és a mesterséges fényforrások hatásának összehasonlítása érdekében próbatesteket helyeztünk a szabad ég alá száraz és párás évszakban. Gondoskodtunk róla, hogy a próbatestek csak napsütésben legyenek kint. Ezekkel a feltételekkel igyekeztünk leválasztani a kitettségi vizsgálatoknál előforduló egyéb behatásokat, továbbá a felhős és a sötét időszakok kizárásával a tényleges besugárzási időket tudtuk használni az összehasonlításokor. Az ilyen speciális körülmények között végzett kitettségi vizsgálatokra a szakirodalomban nem találtunk említést. A különböző fényforrások és a napsugárzás hatásának összehasonlítására is csupán néhány példa akad (Podgorski és munkatársai 1996, Ota és munkatársai 1997).

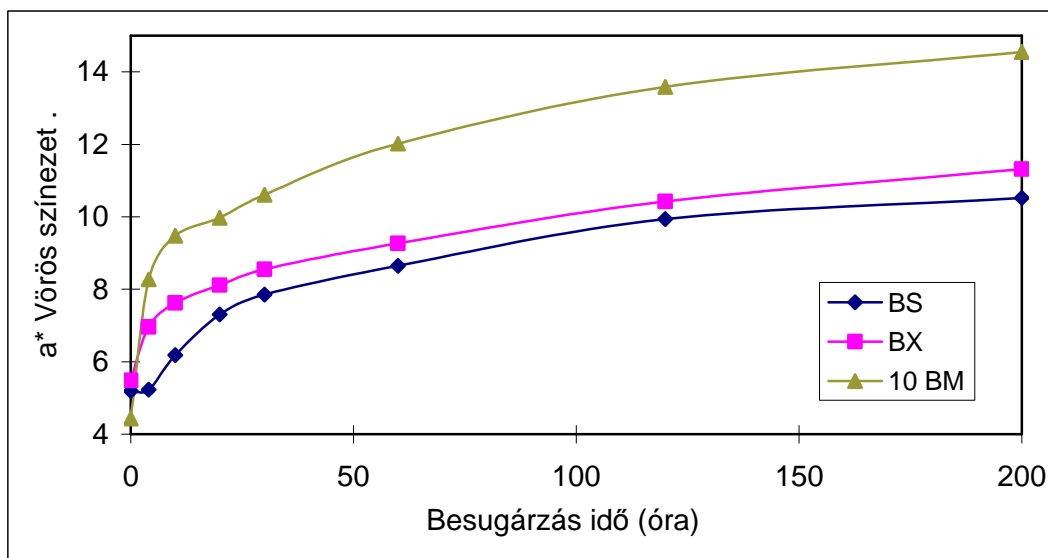
A kezelések hatását a színváltozás és az infravörös színeképek mérésével regisztráltuk. A kezelések kezdetén a színváltozás erőteljesebb volt, mint az infravörös színekép változása. Már néhány órás kezelés után szabad szemmel is észlelni lehetett a változásokat. Ez különösen igaz volt az akác mintákra, de a nyár minták esetében hosszú távon is alig volt észlelhető színváltozás. A kezelés első 30 órájára koncentrált a színváltozások jelentős része, amint ez jól látható a 47-50. ábrákon. A világosság változása volt a teljes színváltozás fő tényezője (47. ábra). Az első 30 órás időtartam alatt a teljes besugárzási időszakra eső világosság-csökkenésnek közel a 60%-a történt meg a lombhullató fafajoknál, és 40-50% -a a fenyőféléknél. Ebben az időszakban a mesterséges fényforrások erőteljesebb világosságcsökkenést okoztak, mint a napsugárzás. A legnagyobb eltérés a lucfenyőnél mutatkozott. Itt a xenonlámpa hatása 15%-kal volt nagyobb a napsugárzásnál. Átlépve az 50 órás kezelést a trend változott, és a grafikonok elérték egymást, vagy párhuzamosan futottak. A higanygőzlámpa a többinél jóval erőteljesebb változást okozott, még a tizedrészére lerövidített idő alatt is. Hatásának elemzésével később foglalkozunk.



47. ábra A bükk faanyag világosságának csökkenése a besugárzási idő függvényében (Rövidítések: B; bükk, S; napsugárzás, X; xenonlámpás besug., M; higanygőzlámpás besug. Higanygőzlámpa esetében az időadatokat 10-zel osztani kell)

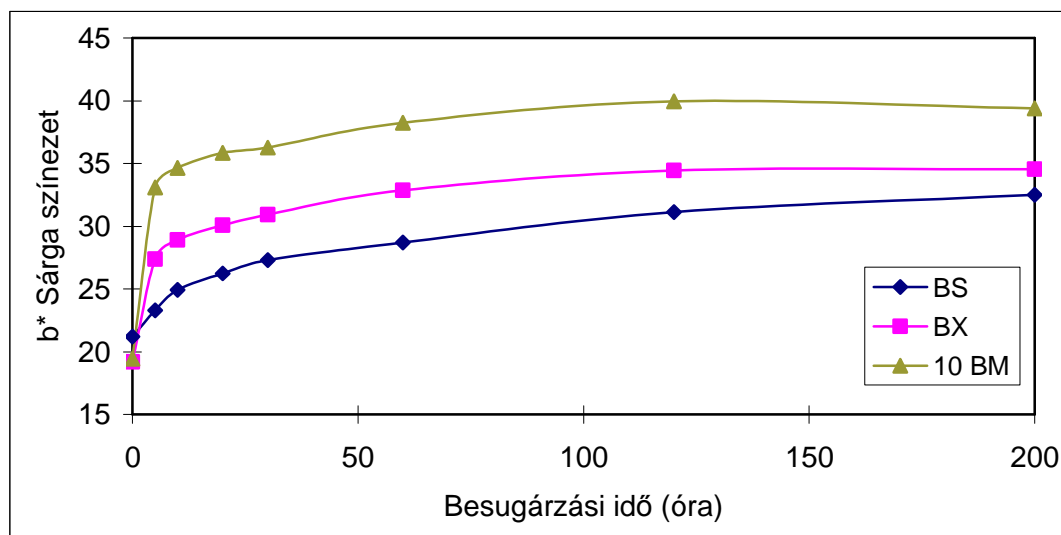
A másik két színekoordináta (a^* és b^*) változása a világosságnál nagyobb eltérést mutatott a xenonlámpa és a napsugárzás között (48-50. ábra). A vörös színezet (a^*) változását a bükk faanyag adataival mutatjuk be a 48. ábrán. Érdekes megfigyelni, hogy a napsugárzás hatására a kezelés első 5 órájában nem történt változás, majd hirtelen

növekedés történt. Sőt a japán ciprus és az álciprus esetében kismértékű csökkenést tapasztaltunk az első 5 órában. Csupán az akác vörös színezete növekedett erőteljesen a kezelés kezdetétől. Ezzel szemben a xenonlámpás kezelés hatására ilyen stagnálást nem tapasztaltunk. A vörös színezet mindegyik mintánál a besugárzás kezdetén erőteljesen emelkedni kezdett. Ez az emelkedés meredekebb volt, mint a napsugárzásnál. A 30 órás kezelés után a trend változott, és a grafikonok megközelítették egymást, vagy párhuzamosan futottak. Azt is gondolhatnánk, hogy a napsugárzás gyenge volt az első napon, és ez okozta a stagnálást. A mérési jegyzőkönyv ezt nem támasztja alá, és a megismételt vizsgálatoknál ugyanez történt.

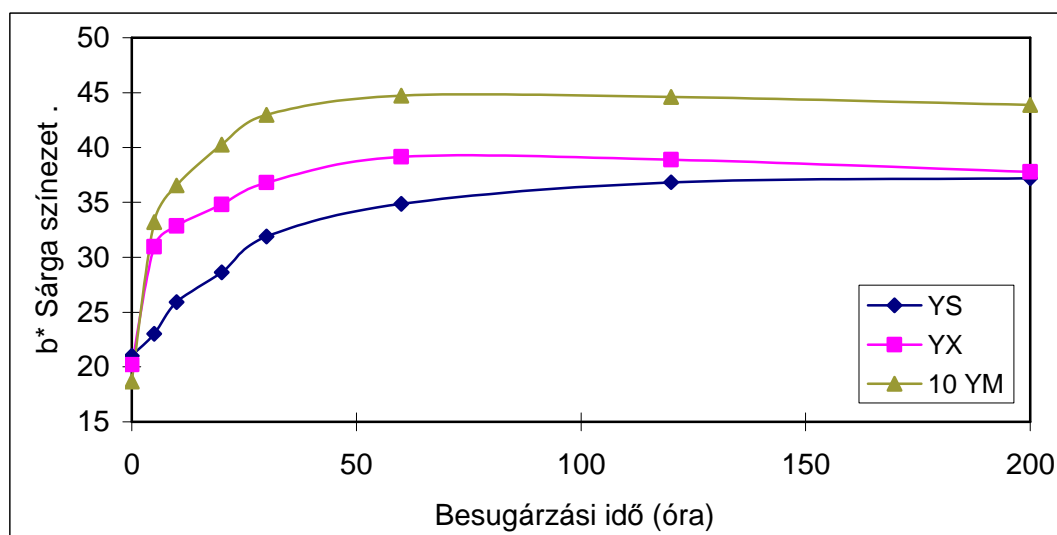


48. ábra A bükk faanyag vörös színezetének változása a besugárzási idő függvényében (Rövidítések: B; bükk, S; napsugárzás, X; xenonlámpás besug., M; higanygőzlámpás besug. Higanygőzlámpa esetében az időadatokat 10-zel osztani kell)

A harmadik színkoordináta (b^* ; sárga színezet változása) esetében még nagyobb volt az eltérés a napsugárzás és a xenonlámpa hatása között, mint a másik két koordináta esetében (49-50. ábra). A minták elsárgulása a xenonlámpa esetében a kezelés első 5 órájára, ezzel szemben napsugárzásnál az első 30 órára koncentrálódott. A álciprus (50. ábra) és a lucfenyő korai pásztája esetében 5 óra alatt a teljes sárgulás 61%-a történt meg a xenonlámpás besugárzás hatására. Napsugárzásnál a sárgulás lefutása ennél sokkal kiegyenlítettebb volt.



49. ábra A bükk faanyag sárge színezetének változása a besugárzási idő függvényében (Rövidítések: B; bükk, S; napsugárzás, X; xenonlámpás besug., M; higanygőzlámpás besug. Higanygőzlámpa esetében az időadatokat 10-zel osztani kell)



50. ábra Az álciprus sárge színezetének változása a besugárzási idő függvényében (Rövidítések: Y; álciprus, S; napsugárzás, X; xenonlámpás besug., M; higanygőzlámpás besug. Higanygőzlámpa esetében az időadatokat 10-zel osztani kell)

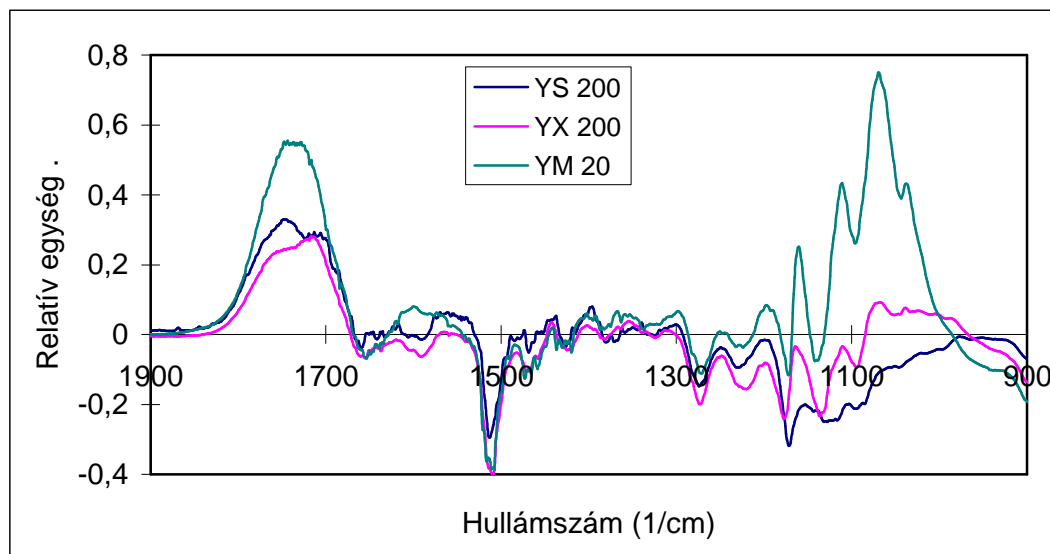
A sárge színezet grafikonjai a vizsgált fafajoknál 50 órás kezelés után közel kerültek egymáshoz vagy párhuzamosan futottak egymással.

A fentiek alapján megállapíthatjuk, hogy a xenonlámpás besugárzás csak a hosszúidejű (60 óránál hosszabb) kezeléseknél alkalmas a napsugárzás imitálására. Különösen a sárge színezet változásában találtunk nagy eltéréseket a rövid idejű besugárzásnál. A rövid idejű xenonlámpás kezelés a gyorsított hatások elérésére alkalmas,

de az idősokszorozási tényező nem állapítható meg, mert az egyes koordináták eltérően viselkednek.

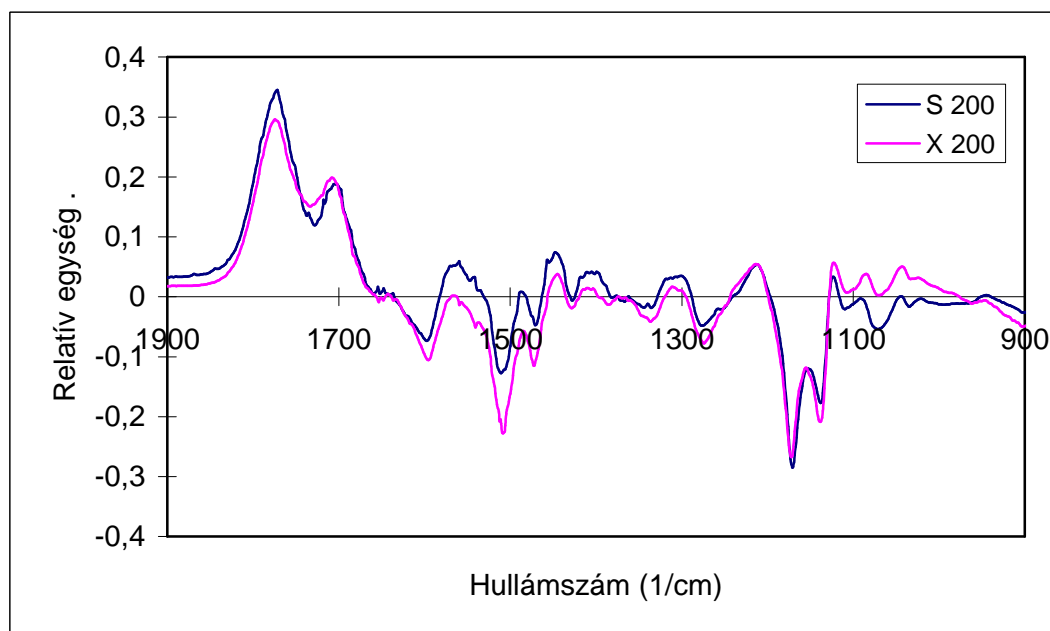
A higanygőzlámpás besugárzás hatására létrejövő színváltozás alapvetően különbözik mind a xenonlámpás mind a napsugárzás hatására történő színváltozástól. Az eltéréseket jól szemléltetik a 47-50 ábrák. Itt a kezelés során a változások sokkal erőteljesebbek voltak, mint a másik két besugárzásnál. Ezért a besugárzást csak 20 óráig folytattuk. Az eltérések oka a higanygőzlámpa által kibocsátott fény hullámhossz-eloszlásában keresendő. Míg a xenonlámpa csak az UV-A tartományban sugároz, addig a higanygőzlámpa a teljes UV tartományban bocsát ki fényt, emissziójának 80%-a az UV tartományba esik. A kibocsátott UV fény 31%-a az UV-A (380-315 nm) tartományba, 24%-a az UV-B (315-280 nm) tartományba és 25%-a az UV-C (> 280 nm) tartományba esik. Az UV-C tartományban kibocsátott fotonok energiája olyan nagy, hogy képesek fölszakítani a faanyagban lévő összes kémiai kötést (Hon 1991). Ezért a higanygőzlámpa nem alkalmas a napsugárzás imitálására, de a vele végzett kísérletek segítséget nyújtanak a fotodegradációs folyamatok jobb megértéséhez, és hozzájárulnak a méréstechnika finomításához. Ezekkel a problémákkal a későbbiekben foglalkozunk.

A színváltozás nem ad közvetlen felvilágosítást a bekövetkezett kémiai változásokról ezért fontos, hogy az infravörös színek változását is megvizsgáljuk. A napsugárzás és a xenonlámpás besugárzás hatása közötti különbségeket akác és álciprus fafajok mintáival készült különbségi színeképek segítségével mutatjuk be (51-53. ábra). Csak az újlenyomat tartományt ($900-1900\text{ cm}^{-1}$ között) ábrázoltuk, hiszen itt találunk számottevő eltéréseket. Az ábrák a 4.2.1. fejezetben leírt lényeges változásokat mutatják (a karbonilcsoportok növekedését $1680-1910\text{ cm}^{-1}$ között, a lignin aromás gyűrűjének felhasadását 1510 és 1600 cm^{-1} ködnyékén és a guajacil gyűrű abszorpciójának csökkenését 1280 cm^{-1} környékén). Az $1000-1200\text{ cm}^{-1}$ közötti tartományban látható változások nem egyértelműek, sőt az 51. ábrán a higanygőzlámpa által okozott változásoknál a $900-1500\text{ cm}^{-1}$ közötti széles tartományban megkérdőjeleződik a különbségi színekép értelmezhetősége. A jelenséggel a 4.2.5. fejezetben foglalkozunk. Az alkalmazott besugárzások hatása közötti eltérések a karbonilcsoportok sávjában jelentkeznek. A 20 órás higanygőzlámpás besugárzás hatására jóval nagyobb abszorpció-növekedés történik, mint a másik két kezelésnél 200 óra alatt. Ennek a nagy intenzitás-növekedésnek a valódisága megkérdőjelezhető. Részletes elemzése a 4.2.5. fejezetben történik. Ezért ebben a fejezetben csak a napsugárzás és a xenonlámpás kezelés hatásának összehasonlításával foglalkozunk.



51. ábra Az álciprus korai pásztájának különbségi színeképei 20, illetve 200 órás besugárzás után. (Rövidítések: Y; álciprus, S; napsugárzás, X; xenonlámpás besugárzás, M; higanygőzlámpás besugárzás)

A 4.2.1. fejezetben tárgyaltakhoz hasonlóan két sáv növekedését figyelhetjük meg a karbonilcsoportok sávjában. Napsugárzásnál a hosszabb hullámszámoknál lévő sáv intenzitása a nagyobb. Xenonlámpás besugárzásnál viszont a rövidebb hullámszámoknál lévő sáv intenzitása a nagyobb. Akác esetében ez a két sáv jól elkülönül, mert az 1700



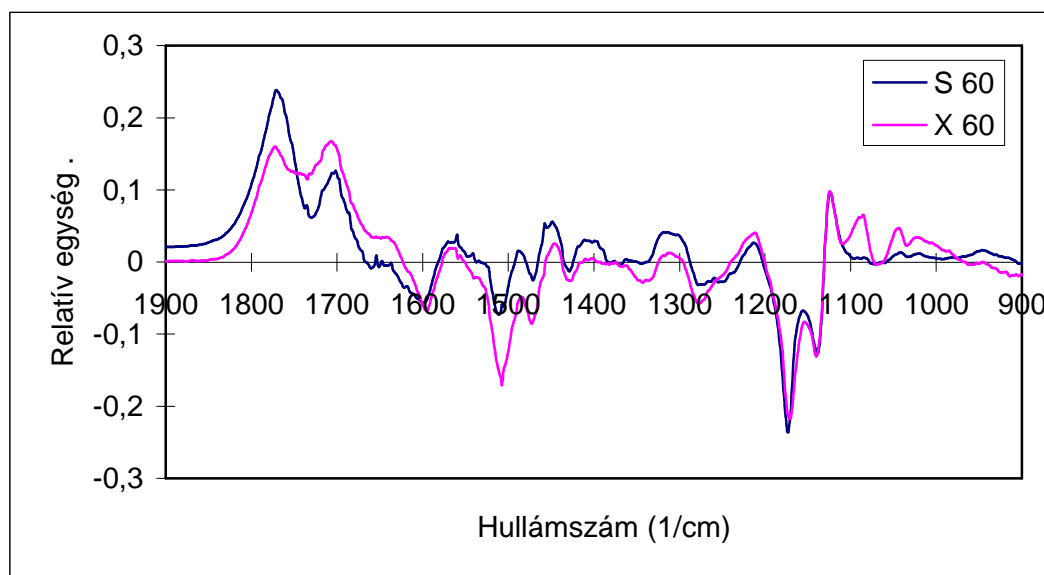
52. ábra Az akác faanyag különbségi színeképei 200 órás xenonlámpás besugárzás (X) és 200 órás napsugárzás (S) után

cm^{-1} körüli sáv lényegesen gyengébb, mint a másik (52. ábra). A 200órás besugárzásnál ez az eltérés a kétféle besugárzás hatása között nem jelentős.

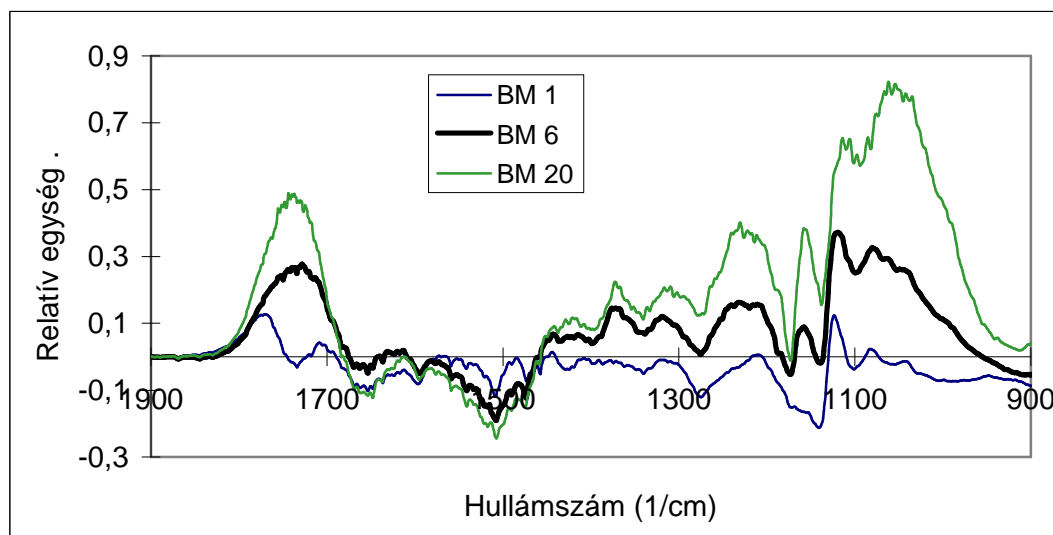
Fontos megemlíteni, hogy a kezelés során az itt láthatónál lényegesen nagyobb eltérések is voltak. A xenonlámpás besugárzásnál az $1700\text{-}1710\text{ cm}^{-1}$ körüli sáv a kezelés kezdetén gyorsabban nőtt, mint az $1760\text{-}1770\text{ cm}^{-1}$ körüli sáv. Az $1700\text{-}1710\text{ cm}^{-1}$ körüli sáv növekedése megállt 60 órás kezelés után, a másiké viszont folytatódott. A napsugárzás hatására ez éppen fordítva történt, amint ezt jól szemlélteti 60 órás kezelés után az 53. ábra akác esetében. Itt az $1700\text{-}1710\text{ cm}^{-1}$ körüli sáv folyamatosan növekedett a kezelés 200 órája alatt. Az eltérések 60 órás kezelés után a kiegyenlítődés felé haladtak, és 200 óránál már alig voltak eltérések. A fent leírt tendenciák valamennyi vizsgált fafajra érvényesek voltak.

A színváltozáshoz hasonlóan itt is megállapíthatjuk, hogy a xenonlámpás besugárzás csak hosszú idejű (60 óránál hosszabb) kezelésnél tudja imitálni a napsugárzást. A rövid idejű besugárzásoknál eltérés van a két besugárzás hatására lejátszódó kémiai folyamatok között.

A higanygőzlámpás besugárzásnál is látható volt a két karbonilsáv növekedése rövid kezelési időknél (54. ábra). Az egy órás kezelés hatására a két sáv elkülönülése ugyanolyan



53. ábra Az akác faanyag különbségi színeképei 60 órás xenonlámpás besugárzás (X) és 60 órás napsugárzás (S) után



54. ábra A bükk faanyag különbségi színeképei 1; 6 és 20 órás higanygőzlámpás besugárzás után

jól látható volt, mint a másik két kezelésnél. Ezután a sávok összeolvadtak egy sávba. Alapos megfigyelés után itt is látszik, hogy eleinte a rövidebb hullámszámoknál lévő sáv növekedett erőteljesebben, majd a tendencia megfordult. Erre a következtetésre az egybeolvadt sáv maximumának a hosszabb hullámszámok irányába történt elmozdulásából juthatunk. Az 54. ábrán az is jól látszik, hogy a különbségi színeképeknek az $1000\text{--}1500\text{ cm}^{-1}$ tartományban jelentkező anomáliája a kezelési idő növekedésével fölerősödik. A fentiek alapján megállapíthatjuk, hogy a higanygőzlámpa nem alkalmas a napsugárzás imitálására.

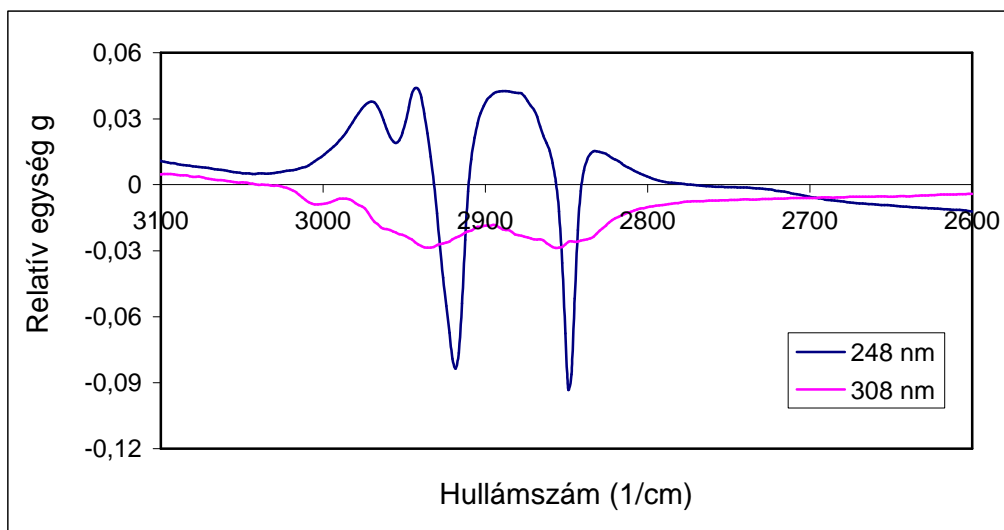
A lézerek szigorúan egy adott hullámhosszú fényt bocsátanak ki. A vizsgálatainknál a Szegedi Egyetem Kísérleti Fizikai Intézetében rendelkezésre álló impulzus üzemű lézereket alkalmaztuk. A mintáink teljes felületének megvilágításához a lézersugarat szórólencsével széttartóvá tettük. Ez a megoldás lehetőséget adott a minta felületére jutó fényintenzitás változtatására is. A minták távolításával egyre gyengébb intenzitású fény érte őket. A mintákat érő fényteljesítmény-sűrűség $10^9\text{--}10^{10}\text{ W/m}^2$ nagyságrendű volt. Ehhez képest a napsugárzás fényteljesítmény-sűrűség a földfelszínen 7 nagyságrenddel kisebb. Ezért nyilvánvaló, hogy az impulzuslézerekkel kapott fotodegradációs eredmények közvetlenül nem hasonlíthatók össze a napsugárzásával. A besugárzás adatait viszont minden más fényforráshoz képest sokkal pontosabban tudjuk mérni, amint ezt az 1. táblázat (18. oldal) jól mutatja. Ez a mérési pontosság lehetőséget kínál arra, hogy feltárjuk a fotodegradációnak a besugárzó fény adataitól való függését. A lehetőségek és az eredmények részletes feltárása egy a jelen munkához hasonló

terjedelmű dolgozat témája lehet. Ezért itt csupán két, a fotodegradáció megértését segítő eredmény bemutatására szorítkozunk.

A metilcsoportokkal kapcsolatban már korábban említettük (60. oldal), hogy nem egyforma a kutatók véleménye arról, hogy szenvednek-e változást a fotodegradáció során. Széleskörű tapasztalataik alapján Forsskahl és Janson (1992) stabilnak mondja a metilcsoportok $2840\text{--}3050\text{ cm}^{-1}$ közötti sávját. A mi eredményeink szerint viszont két sáv csökkenését láthatjuk 2876 és 2930 cm^{-1} hullámszámok környékén (39. ábra) higanygőzlámpás besugárzás esetén. A lézeres besugárzásnál azt tapasztaltuk, hogy a 248 nm -es hullámhosszú fénnel történő besugárzásnál jelentős abszorpció-csökkenés van 2850 és 2920 cm^{-1} -nél (65. ábra). Ezeket a sávokat Weinhaus és munkatársai (1988) a CH_2 jobbos (2850 cm^{-1}) és CH_2 balos (2920 cm^{-1}) abszorpciójaként azonosították. A kismértékű csökkenés 2960 cm^{-1} környékén a CH_3 csoportokhoz tartozik. A kismértékű hullámszám-eltérések abból adódnak, hogy ők az összetett sáv vállai alapján határozták meg az általuk közölt hullámszámokat, melyek általában nem a valódi maximumok.

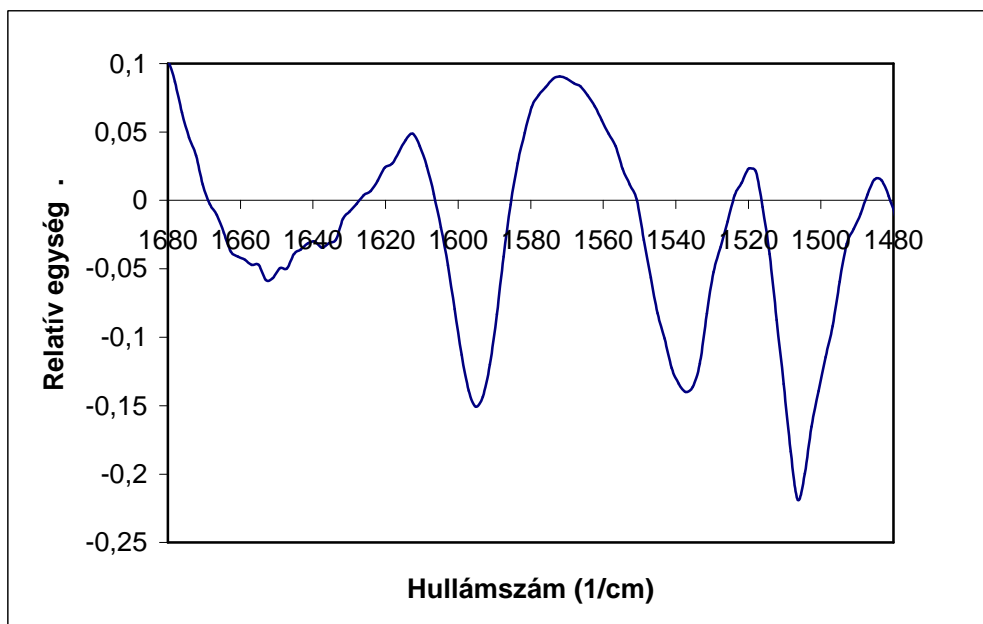
Ha a besugárzást 308 nm -es hullámhosszon végezzük, akkor alig történik változás ebben a tartományban. A jelenség azzal magyarázható, hogy a 308 nm -es hullámhosszú fény fotonjainak energiája nem elegendő, hogy a metilcsoportok kötését felszakítsák, de 248 nm -es fényenél ez már megtörténik. A xenonlámpa gyakorlatilag nem bocsát ki 300 nm -nél rövidebb hullámhosszú fotonokat (46. ábra), és a szakirodalomban leírt fotodegradációs vizsgálatok döntő részét xenonlámpával végezték. Nem csoda, hogy nem tapasztaltak számottevő változást a metilcsoportok abszorpciójában. A higanygőzlámpának viszont vannak emissziós sávjai egészen 240 nm -ig. Ezek után kijelenthetjük, hogy az 1995-ben publikált munkánkban (Tolvaj és Faix 1995) a metilcsoportok sávjában tapasztalt abszorpciócsökkenés nem mérési hiba (amint azt ott valószínűsítettük), hanem valódi változás.

Hasonlóan vitatott kérdés, hogy a lignin aromás gyűrűjének abszorpciócsökkenése 1600 cm^{-1} környékén sok esetben nem jól látható, mert a konjugált helyzetű karbonil csoportok abszorpciónövekedése ezt kioltja, illetve kompenzálja. Lézeres besugárzásnál ez az átfedés jól látható (66. ábra). A karbonilcsoportok széles ($1550\text{--}1630\text{ cm}^{-1}$) abszorpciónövekedést mutató sávjában megjelenik jól láthatóan a lignin aromás gyűrűje abszorpciójának csökkenése 1600 cm^{-1} környékén.



65. ábra Az erdeifenyő szijácsa, korai pásztájának különbségi színeképe 248 és 308 nm-es hullámhosszú lézerrel történt, 100 Joule-os besugárzás után.

Megjelenik továbbá egy eddig még nem tapasztalt abszorpciósökkenés is 1540 cm^{-1} környékén. A jelenség értelmezése további kémiai vizsgálatokat igényel. Ezen sáv mellett még további eddig még nem tapasztalt, itt nem részletezett abszorpciósökkenések is megjelennek a 248 nm-es besugárzásnál. Ez persze nem meglepő hiszen ezek a fotonok olyan nagy energiával rendelkeznek, hogy képesek felszakítani a faanyagban lévő bármelyik kémiai kötést (Hon 1991)



66. ábra A kőris gesztje, késői pásztájának különbségi színeképe 248 nm-es hullámhosszú lézerrel történt, 100 Joule-os besugárzás után.

A mesterséges fényforrások alkalmazása eredményeinek összefoglalása:

A természetes és a mesterséges fényforrások hatásának összehasonlítására elsőként végeztünk olyan kísérleteket, ahol a szabadba kitett mintákat csak napsugárzás érte, egyéb behatás (például: eső) nem. Továbbá a kezelési idő valóban csak napsütéses órákat számoltuk bele. Megállapítottuk, hogy a higanygőzlámpa csak hosszúidejű kezelésnél alkalmas a napsugárzás imitálására. Rövid idejű (60 óránál rövidebb) kezelésnél a higanygőzlámpa lényegesen nagyobb sárgulást okoz, mint a napsugárzás és a karbonilcsoportokat tartalmazó vegyületek keletkezésében is eltérések vannak. Kimutattuk, hogy a higanygőzlámpa nem alkalmas a napsugárzás imitálására.

Megállapítottuk, hogy a lézerek felhasználása nem alkalmas a napsugárzás imitálására, de jól használható a fotodegradáció jelenségeinek megértéséhez. Segítségükkel kimutattuk, hogy a metilcsoportok degradációja a xenonlámpás besugárzásnál azért nem figyelhető meg, mert az általa kibocsátott fény fotonjainak energiája nem elegendő a kémiai kötések felszakításához, míg higanygőzlámpás besugárzásnál ez megtörténik. Kísérleteinkkel sikerült láthatóvá tenni az $1550\text{--}1630\text{ cm}^{-1}$ hullámszám tartományban egymást átfedő és a fotodegradáció hatására ellentétesen változó sávokat

4.2.4. A geszt és a szijács korai és késői pásztája fotodegradációjának vizsgálata

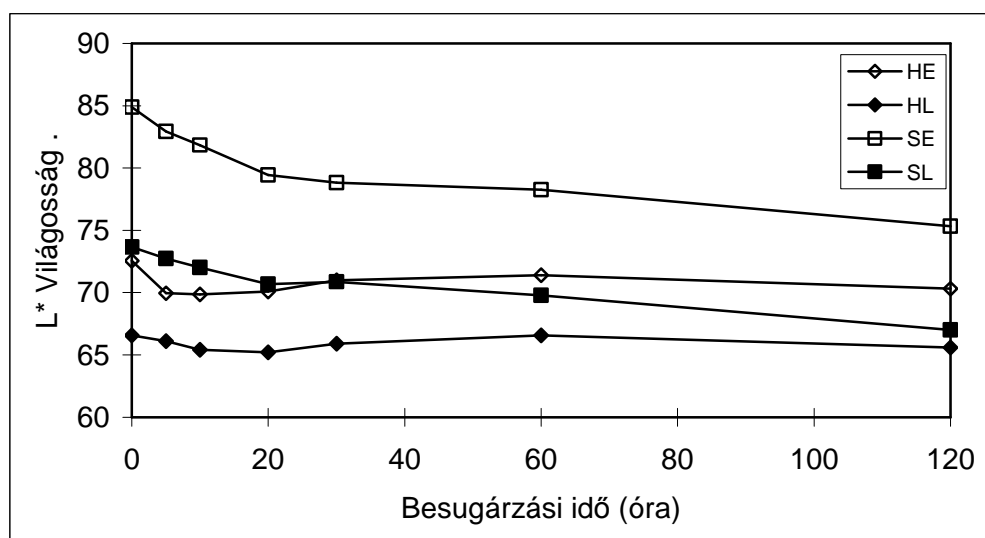
Régi épületek időjárásnak kitett fa szerkezetein tanulmányozhatjuk, hogy a faanyag különböző szövetei milyen mértékben állnak ellen az időjárás viszontagságainak. Ilyen károsodott faanyagokat mutat a 7 és 8 kép „kemény és puha” faanyag esetében. A felvételek egy japán templom tető alatt (de nyitott térben) lévő szerkezeti elemeit mutatják. Jól látható, hogy a késői pászta ellenálló képessége sokkal nagyobb, mint a korai pásztáé. A korai pásztától a késői pászta felé az átmeneti réteg ellenálló képessége fokozatosan növekszik. A késői pászta és az utána a következő tavaszon növekvő korai pászta közötti határ viszont élesen elkülönül. Ennek oka, hogy ezen a határ két oldalán lévő sejtek szerkezete alapvetően eltér egymástól.

Az egyes pászták fénybesugárzással szembeni ellenálló képességének feltárásához olyan tangenciális felszínű mintasorozatokat készítettünk, melyek csak egyféle pásztát tartalmaztak a felszínükön. A pászták viselkedése közötti eltéréseket színméréssel és az infravörös színek felvételével igyekeztünk feltárni.

A színváltozás nem mutatja meg egyértelműen a pászták eltérő viselkedését, hiszen a késői pászta rendszerint sötétebb, mint a korai pászta, és némelyik fafajnál a geszt

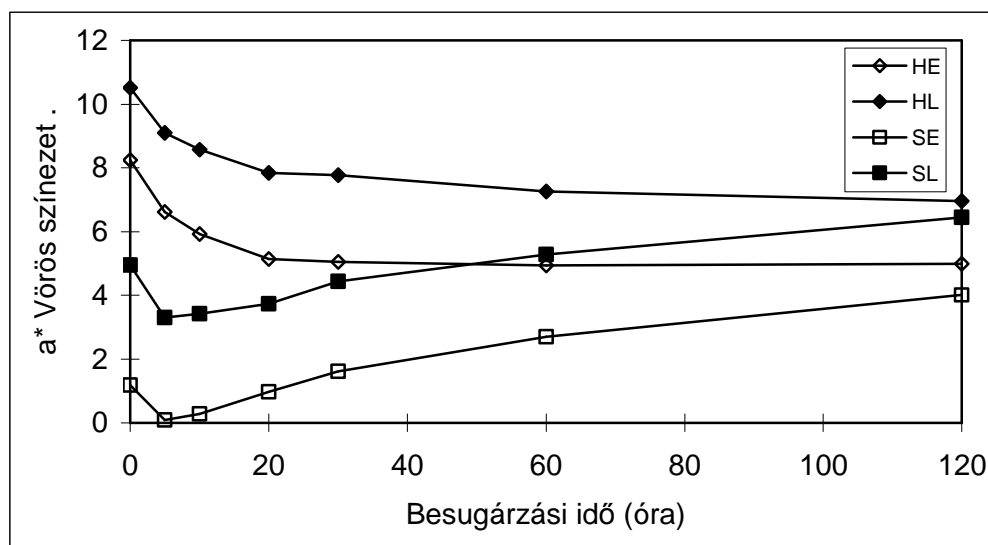
lényegesen sötétebb, mint a szijács. Erre a típusra jó példa a japán ciprus. Más esetekben, mint például a nyár faanyagánál, az egyes pásztákat szabad szemmel alig lehet megkülönböztetni egymástól. Itt az okoz bizonytalanságot, hogy az eltérőnek vélt pászták valóban eltérőek-e.

A színváltozások viselkedését a napsugárzásnak kitett japán ciprus adataival mutatjuk be. Az 55-57. ábrák a négyféle pászta világosságának, vörös és sárga színezetének változását szemléltetik. A világosság változásánál nem találunk lényeges eltérést a pászták viselkedése között (55. ábra). Abban látszik kis különbség, hogy a korai pászták a kezelés első néhány órájában gyorsabban sötétednek, mint a késői pászták. A geszt korai pásztájánál kismértékű világosodás is bekövetkezett. Ez a világosodás a mesterséges fényforrások esetében sohasem volt megfigyelhető. A napsugárzás esetében viszont néhány sötét, késői pásztáknál előfordult (pl.: tölgy és gyertyánszil). Azt is megfigyeltük, hogy a nedves időszakban kitett mintáknál a világosodás erősebb volt, mint a száraz időszakban kitetteknél. Ebből arra következtetünk, hogy a világosodásban a vízpárának van szerepe, mert a sötét degradációs termékek egy részét kioldja a faanyagból.



55. ábra A japán ciprus pásztái világosságának változása napsugárzás hatására (Jelölések: H; geszt, S; szijács, E; korai pászta, L; késői pászta)

Az 56. ábra tanúsága szerint a vörös színezet alapján a japán ciprus négyféle pásztája jelentősen elkülönül egymástól. A fotodegradáció során viszont ezek a különbségek nagymértékben csökkennek. Az akác kivételével valamennyi vizsgált fafaj esetében az első öt órában csökkent (vagy változatlan maradt) a vörös színezet függetlenül attól,



56. ábra A japán ciprus pásztái vörös színezetének változása napsugárzás hatására (Jelölések: H; geszt, S; szijács, E; korai pászta, L; késői pászta)

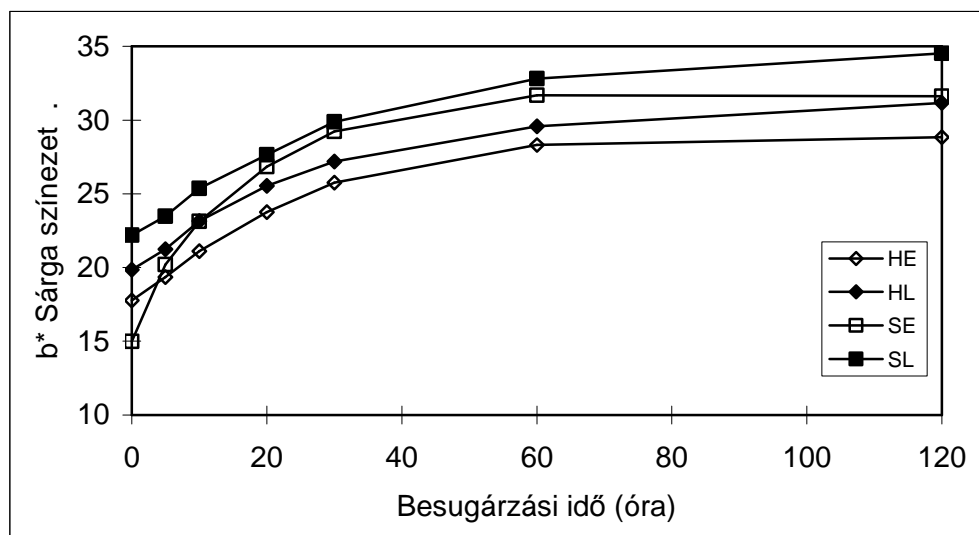
hogy milyen volt a kiindulási állapot. A megismételt vizsgálatok is ugyanezt az eredményt mutatták. A jelenség magyarázata további vizsgálatokat igényel.

A rövid idejű csökkenés után viszont a vörös színezet mérőszáma a minták döntő többségénél folyamatosan növekedett a vizsgált időintervallumban. Csupán néhány eredendően vörös színezetű pászta esetében volt folyamatos csökkenés (pl.:japán ciprus).

A fafajok között a sárga színezetben nagy az eltérés. Amíg ez a lucfenyőnél 15-körüli érték, addig az akácnál ennek a duplája is előfordul. Egy fafajon belül viszont az eltérések a pászták között relatíve kicsik. A szabad szemmel érzékelhető nagy színbeli eltérések a pászták között a színmérésnél inkább a vörös színkoordinátánál jelentkeznek. A sárga színezet változását szemlélteti az 57. ábra. Ez a színkoordináta valamennyi fafaj esetében és mindegyik fajta besugárzásnál növekedést mutatott.

A szijács korai pásztájának viselkedése tért el leginkább a többi pásztától. A japán ciprus esetében például a kitettség első 30 órájában ennél a pásztánál lényegesen nagyobb sárgulást figyeltünk meg, mint a többi pásztánál.

A színkoordináták változásának mérésével nem állapítható meg egyértelműen az egyes pászták fotodegradációval szembeni érzékenységeinek sorrendje. Ennek ellenére elmondhatjuk, hogy a szijács valamivel érzékenyebbnek tűnt, mint a geszt. A szijácson belül viszont a korai pászta nagyobb változásokat szenvedett, mint a késői pászta.

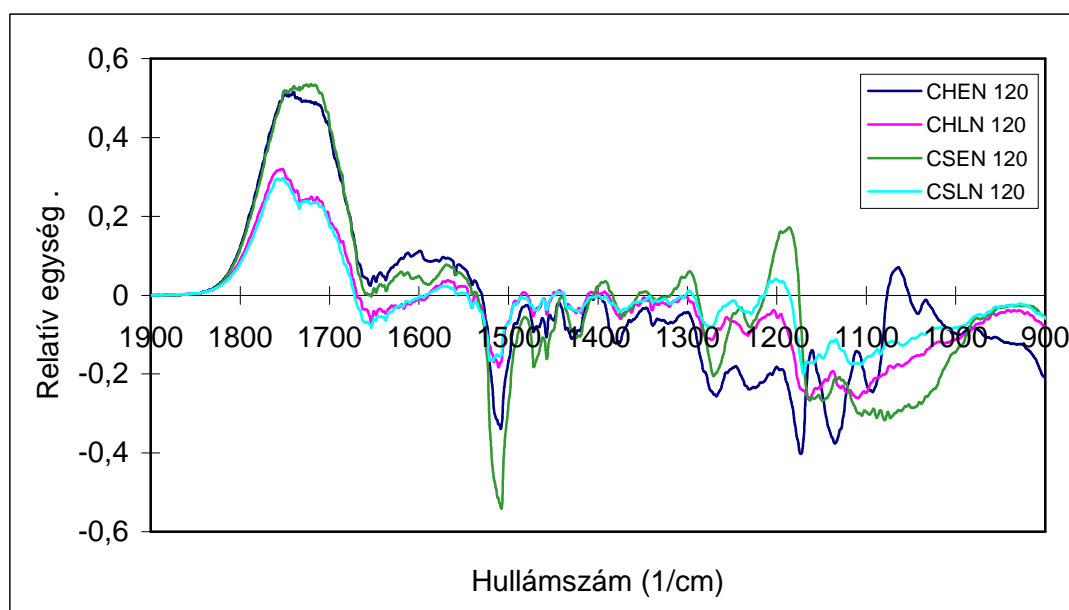


57. ábra A japán ciprus pásztaí vörös színezetének változása napsugárzás hatására (Jelölések: H; geszt, S; szijács, E; korai pászta, L; késői pászta)

Az infravörös színekép segítségével több információt kapunk a pászta fotodegradációval szembeni érzékenységről, mint a színméréssel. A lényeges eltérések a nem konjugált karbonilcsoportok és a lignin aromás gyűrűjének abszorpciós sávjában találhatók. Ezt szemlélteti az 58-60. ábra japán ciprus, éger és köris faanyag esetében.

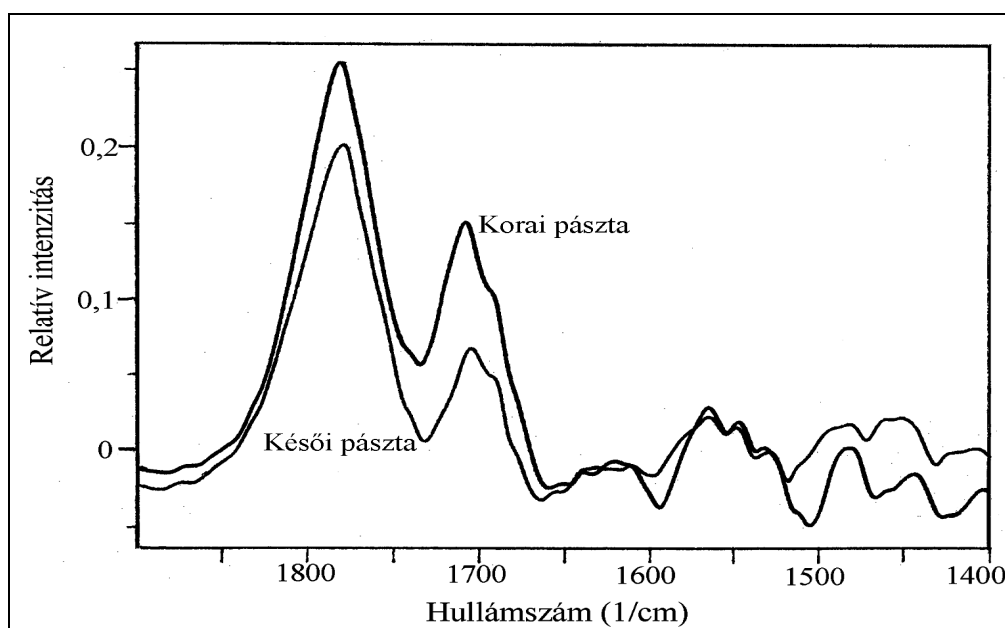
Megállapíthatjuk, hogy a korai pászta esetében az abszorpció csökkenése az 1510 cm^{-1} hullámszám környékén nagyobb, mint a késői pásztaéknál. Ugyanez mondható el a karbonilsáv növekedéséről is. A geszt és a szijács késői pászta közel azonos módon viselkedik a fenyőfélék esetében (58. ábra). A korai pászta között viszont találunk különbségeket.

A vörösfenyőnél például jelentős eltérést tapasztaltunk a geszt késői pászta esetében. Ez a pászta olyan kismértékű változást mutat, hogy a változás alig emelkedik ki a zajszintből. A vörösfenyő ezen tulajdonsága lehet a magyarázata a különlegesen jó időjárás-állóságának. A korai pászta közül a szijácsban lévő degradálódása a nagyobb mértékű. Ezt jól mutatja az 1510 cm^{-1} hullámszám környéki sáv csökkenése, ami a fenyőféléknél különösen jelentős. A karbonilsávban az 1710 cm^{-1} környéki abszorpció is valamivel jobban növekszik a szijács korai pásztaéjánál, mint a geszténél. Az 1770 cm^{-1} körüli abszorpció növekedése kevésbé függ

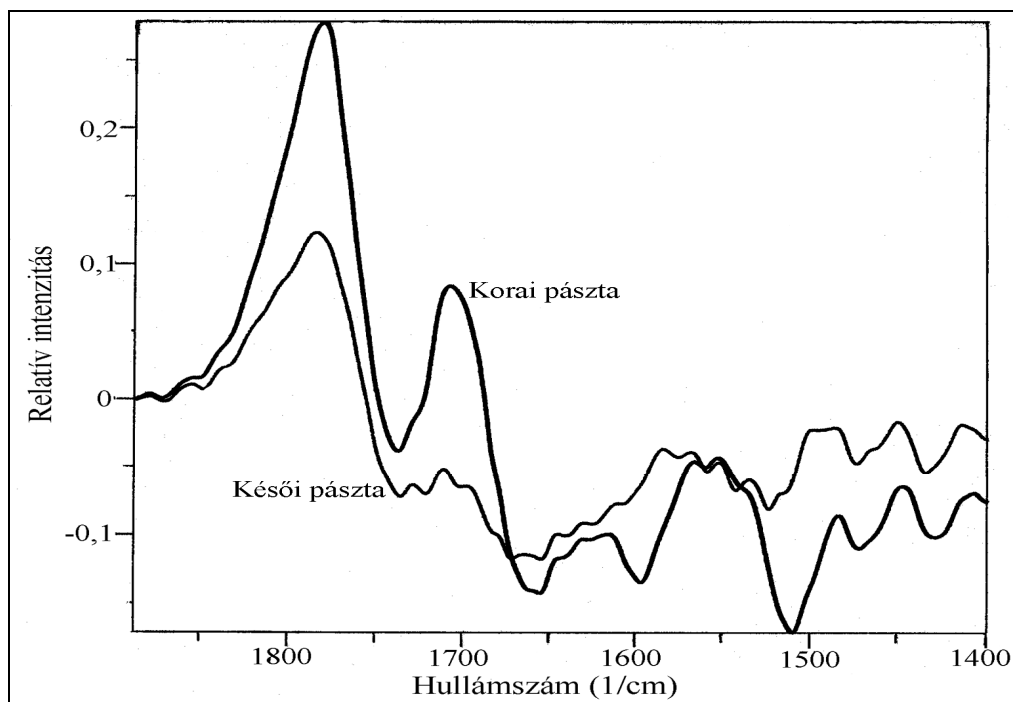


58. ábra A japán ciprus pásztáinak infravörös, különbségi színeképe 120 órás napsugárzás (N) hatására. (Jelölések: C; japán ciprus, H; geszt, S; szijács, E; korai pászta, L; késői pászta)

a pászta milyenségétől, az 1710 cm^{-1} környékén lévő vizont mutat eltéréseket. Ez a jelenség a lombhullató fafajoknál nagyon jól látszik, hiszen a keménylombos fafajoknál a karbonilsávban megjelenő két csúcs jól elkülönül egymástól (59-60. ábra). A késői pásztánál ez a sáv csak kis mértékben növekszik a másik karbonilsávhoz képest. A geszt késői pásztájánál ez a változás néhány tartós fafaj esetében alig érzékelhető.



59. ábra Az éger szijácsa korai és késői pásztájának infravörös, különbségi színeképe 30 órás xenonlámpás besugárzás esetén



60. ábra A kőris gesztje korai és késői pásztájának infravörös, különbségi színeke 30 órás xenonlámpás besugárzás esetén

Ilyen fafaj például a kőris (60. ábra), a tölgy, a gyertyánszil és az akác. Eltérések az $1000\text{--}1200\text{ cm}^{-1}$ hullámszám tartományban is láthatók, de ezek az eltérések inkább abból fakadnak, hogy a K-M elmélet alkalmazhatósága itt kétséges.

Összefoglalásként megállapíthatjuk, hogy a késői pászták ellenálló-képessége a fotodegradációval szemben lényegesen jobb, mint a korai pásztáké. Néhány fafajnál a geszt késői pásztája csak kismértékű károsodást szenved. A korai pászták közül a szijácsban lévő az érzékenyebb a fénybesugárzásra. A pászták közötti lényeges eltérések az 1510 cm^{-1} körüli sáv csökkenésénél és az 1710 cm^{-1} körüli sáv növekedésénél figyelhetők meg.

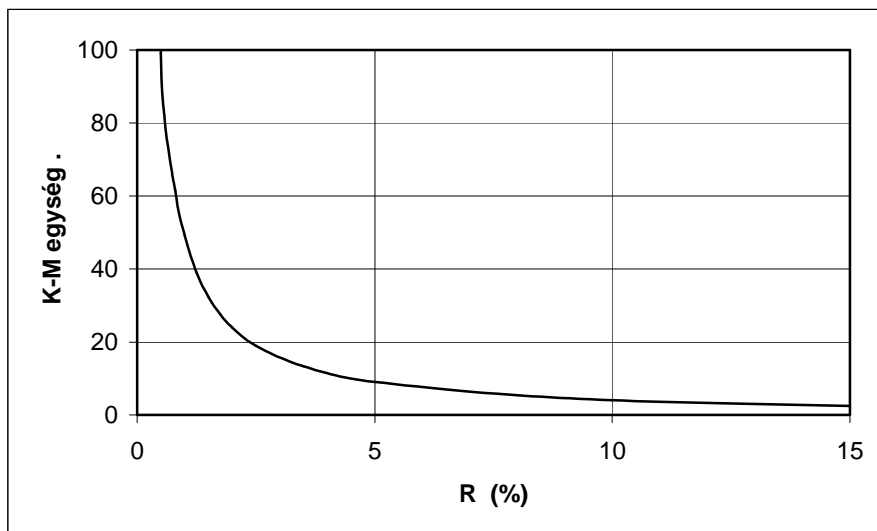
4.2.5. A Kubelka-Munk elmélet korlátai faanyagok vizsgálatánál

A faanyagokban kezelések hatására bekövetkező kémiai változások követésére széles körben alkalmazzák a diffúz reflexiós színeképből a K-M elmélet alapján meghatározott K-M függvényt, melyet abszorpciós színeképként használnak. Ez különösen igaz a fotodegradációs vizsgálatokra. A szakirodalomban azonban nem találtunk olyan publikációt, amelyik a K-M elméletnek az alkalmazhatóságát vizsgálta a faanyagokra vonatkozóan. A probléma megvizsgálása azért is fontos, mert a K-M elméletet a fényt gyengén abszorbeáló anyagok vizsgálatára dolgozták ki. A faanyag viszont erősen

abszorbeálja a fényt. Ebben a fejezetben megkeressük azokat a határokat, ahol a K-M elmélet jól használható, illetve további függvénymanipulációkkal használhatóvá tehető.

Ha ábrázoljuk a K-M függvényt (61 ábra), akkor egy hiperbola jellegű görbét kapunk. Ez a görbe 4%-os (R) reflexió (12 K-M egység) fölött jó közelítéssel egyenesnek tekinthető. Itt a reflexiónak az abszorpció-növekedés miatti csökkenésével a K-M egységek arányosan növekednek, ezért az abszorpció-növekedést jól követik a K-M egységek. Ennél kisebb reflexiónál viszont a reflexió csökkenésével egyre rohamosabban növekszenek a K-M egységek, tehát nem mutatják helyesen az abszorpció növekedését. Ha a vizsgálni kívánt sáv közelében van olyan sáv, amelyikről biztosan tudjuk, hogy az alkalmazott kezelés nem változtatatta meg az értékét, és az intenzitása közel azonos mint a vizsgálandó sáv, akkor erre a maximumra normálva a függvényeket itt helyes eredményre juthatunk. Ha viszont a K-M egység értéke meghaladja a 40-et, a K-M függvény már majdnem függőlegessé válik. Ezen a szakaszon a nagyon kicsi abszorpciónövekedés is óriási K-M értéknövekedést eredményez. Tehát a K-M függvény nem használható az abszorpcióváltozás megadására.

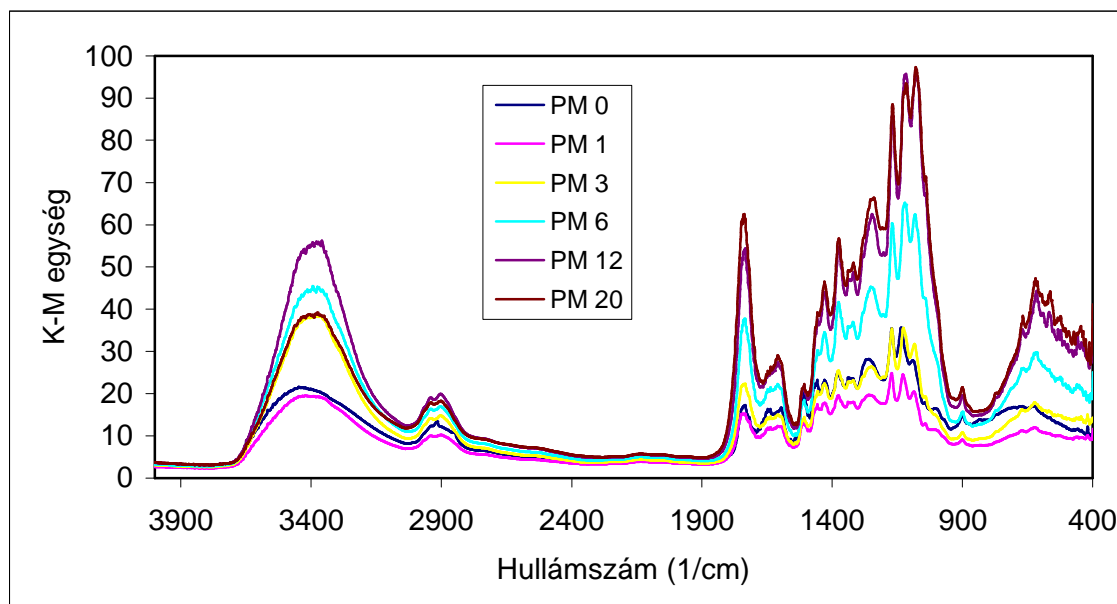
Az itt leírt okfejtést az alábbi példákkal illusztráljuk. Ha a felület érdesítjük, akkor a felület reflexiós tulajdonságai megváltoznak, csökken a detektor által összegyűjthető fény mennyisége. Tehát a K-M egységek növekednek. Jól szemlélteti a jelenséget a 42. ábra, ahol gyalult és csiszolópapírral érdesített bükk felület K-M függvényeit láthatjuk.



61. ábra A K-M elmélet által meghatározott abszorpciós és szórási koefficiens hányadosa (k/s , K-M egységekben) a százalékokban megadott reflexió függvényében

Az érdesítés jelentősen megnövelte a függvényértékeket, pedig abszorpciónövekedés nem történt. Ezért azoknál a kezeléseknél, melyek megváltoztatják a felület érdességét, csak nagy körültekintéssel lehet alkalmazni a K-M elméletet az abszorpcióváltozás meghatározására.

Ilyen jelenség a fotodegradáció ha a fénybesugárzás kellően nagy intenzitású, vagy hosszú ideig tart. A 62. ábra K-M függvény fotodegradáció hatására bekövetkező változását szemlélteti nyár faanyag higanygőzlámpás besugárzás esetén. (A függvényeken semmiféle adatmanipulációt nem végeztünk. Látható, hogy a kezeltlen mintánál az alapvonal magasabban van, mint az 1 óráig kezeltnél. Az alapvonal korrekció ezt az anomáliát megváltoztatja.) A kezelési idő növekedésével a K-M függvény intenzitása mindenütt növekedett. Ott is, ahol biztosan tudjuk, hogy a fotodegradáció nem okoz változást. Ilyen hely a cellulóz C-H csoportjának abszorpciója $1350-1400\text{ cm}^{-1}$ között. De még az 1510 cm^{-1} körüli sávnál is növekedést látunk, pedig a lignin aromás gyűrűjének felhasadása miatt itt csökkenést kellene észlelnünk. Nyilvánvaló, hogy az itt látható nagy változások nem az abszorpciónövekedés következményei. A függvényértékek jelentős emelkedése a teljes vizsgálati tartományban a felületi érdesség növekedésével magyarázható. A 61. ábra jól mutatja, hogy a 12 K-M egység fölötti értékeknél a reflexió csökkenésével rohamosan növekszik

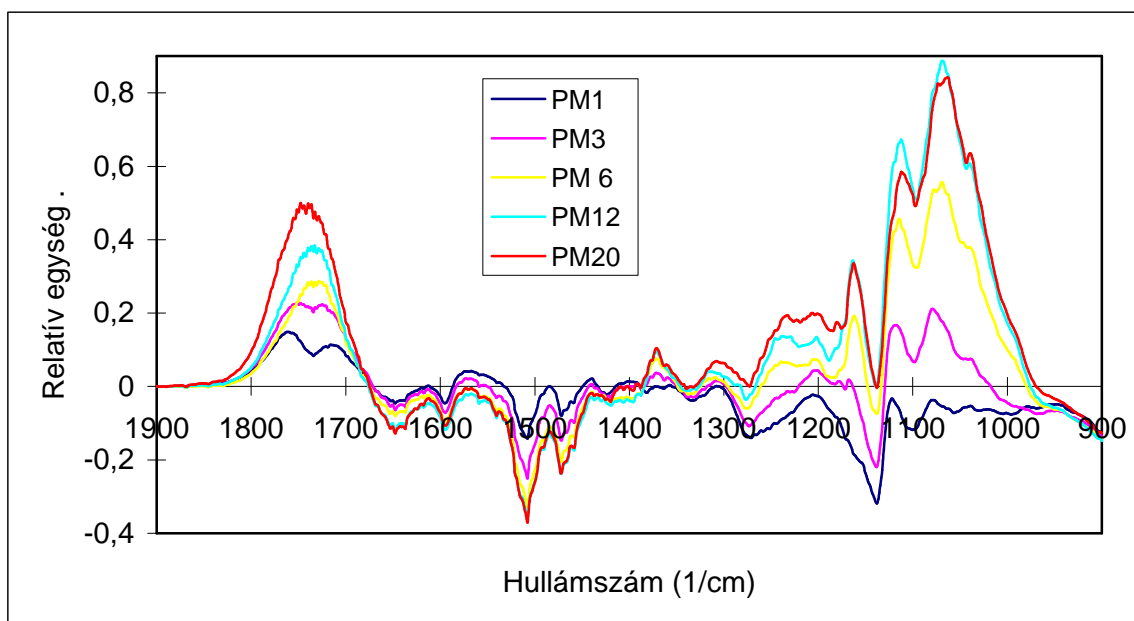


62. ábra A nyár faanyag K-M színeke (0-20 órás) higanygőzlámpás besugárzást követően.

a K-M függvény értéke. Ha a függvényérték meghaladja a 40-et, akkor kicsiny függetlenváltozó-növekedés is nagy függvényérték-növekedést eredményez.

Ha az itt látható állapotában határozzuk meg a különbségi színeképeket, akkor az érdesség növekedéséből származó nagy különbségre ráakódva találjuk meg a fotodegradáció okozta változásokat. Ha a különbségi színekép meghatározása előtt egységnyire normaljuk a függvényeket olyan helyen, ahol a függvény-növekedés hasonló, mint a környezetében (és az nem haladja meg a 40 K-M értéket), akkor van lehetőség a korrekcióra. Erre a célra alkalmas az újlenyomattartomány közepén lévő $1350\text{--}1400\text{ cm}^{-1}$ közötti sáv, hiszen a fotodegradáció nem változtatja meg. Ez a sáv az érdesedés miatt hasonlóan növekedett, mint a tartomány jelentős része. Így erre a sávra normálva a függvényeket az anomália hatása minimalizálható. Ezen normálás után létrehozott különbségi színeképeket a 63. ábra szemlélteti az újlenyomattartományra vonatkozóan.

Az 1 és a 3 órás kezelés hatására létrejövő változás olyan, mint amit a 32. ábrán látunk, tehát nem mutat anomáliát. A hosszabb kezelési időknél viszont már jelentkeznek az anomáliák. A karbonilcsoportok sávjában ($1690\text{--}1800\text{ cm}^{-1}$) jól látható a két sáv növekedése, melyek növekvő kezelési idővel úgy átfedik egymást, hogy egy sávnak látszanak. A növekedés üteme megfelel az alkalmazott besugárzási időnek. Anomália csak a 20 órás kezelés függvényénél tapasztalható. Itt a maximumnak a hosszabb hullámszámok felé történő eltolódását is megfigyelhetjük.



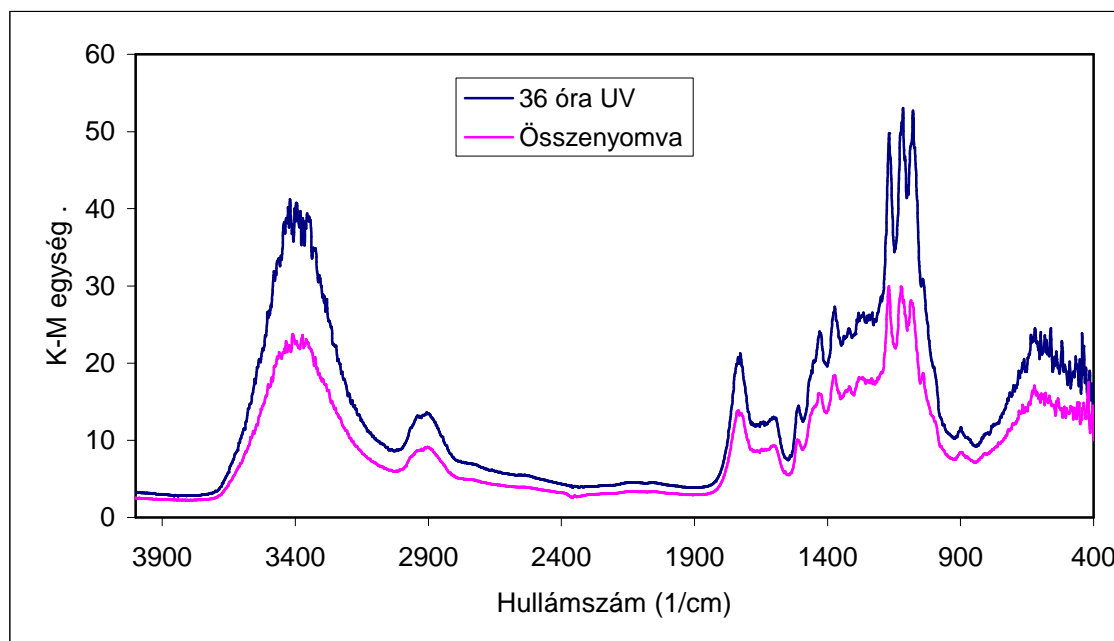
63. ábra A 60 ábrán látható színekép felhasználásával képzett különbségi színekép nyár faanyag higanygőzlámpás besugárzása esetén

Rátekintve a 62. ábrára láthatjuk, hogy a K-M értékek itt már meghaladják a 40 egységnyi határt, melyet az 61. ábra alapján állapítottunk meg.

A lignin aromás gyűrűje abszorpciójának csökkenését (1510 cm^{-1} -nél) már 12 órás kezelésnél sem mutatja jól a különbségi színekép. Itt folyamatos csökkenésnek kellene bekövetkezni, de stagnálást látunk. A 62 ábránál ebben a sávban is túlléptük a 40 egységnyi küszöböt, ezért az anomális függvényérték-növekedés eltünteti az abszorpciócsökkenést. Az $1000\text{-}1300\text{ cm}^{-1}$ tartományban már a 6 órás kezelésnél átlépjük a 40 egységnyi küszöböt. Ezért nem meglepő a különbségi színekép torzulása. Az egész tartományban nagymértékben megemelkedik a különbségi színekép. De ilyen jellegű és mértékű abszorpció-növekedés nem történhetett. Az $1100\text{-}1200\text{ cm}^{-1}$ között található abszorpció-csökkenés jól mutatja a történeteket. Miközben az egész különbségi színekép megemelkedik, ez a negatív sáv továbbra is jól látható, amint ráül a fő változásra. Fontos felhívni a figyelmet: ha csak a 20 órás kezelés által létrehozott változást nézzük, akkor már nem vesszük észre, hogy ez valójában egy negatív sáv.

Sok különbségi színekép meghatározása során szerzett tapasztalatok megerősítik a 61. és a 63. ábra alapján levont következtetést, hogy a K-M elméletet faanyagokra csak akkor alkalmazhatjuk, ha a függvényértékek nem haladják meg a 40 K-M egységet. Mivel a faanyag a ráeső fénynek a döntő többségét elnyeli, ezért a mérési eredmények többsége az 61. ábra görbült szakaszára esik. Csak akkor kapunk elfogadható eredményt, ha a vizsgált tartomány közelében van olyan (a kezelés hatására nem változó) sáv, amelyiket belső vonatkoztatási pontként használhatunk. Ezen sávnál azonos értékre normálva a kezelés előtt és után felvett színeképet, már az abszorpció-változást jól leíró különbségi színeképet kaphatunk.

Kínálkozik egy lehetőség abban az esetben, ha a felületi érdesség miatt a K-M elmélet nem alkalmazható. Nyomással a felületi érdesség csökkenthető. Ezt szemlélteti a 64. ábra álciprus esetében. A 36 órás, higanygőzlámpás besugárzás után a minta felületére egy karos prés fémlapja segítségével $10\text{ másodpercig } 2,5 \times 10^6\text{ Pa}$ nyomást gyakoroltunk. Ezzel a nyomással csökkentettük a felületi érdességet. A nyomás hatására a függvényintenzitások jelentősen csökkentek. A módszer segítségül hívható azokban az esetekben, amikor a felület érdességének növekedésével a reflexiós képessége oly mértékben lecsökken, hogy a K-M elmélet már nem alkalmazható. Azt is érdemes megfigyelni, hogy az összenyomás hatására a színekép zajossága csökken, és ezzel a kiértékelhetősége növekszik. A jelenség magyarázata abban keresendő, hogy a reflexió



64. ábra Az álciprus K-M színeképe 36 órás higanyőzslámpás besugárzást követően és az ezt követő összenyomás után

csökkenésével a detektor egyre kisebb jelet kap, amit a készülék automatikus erősítéssel kompenzál, de ez egyben a zajok felerősítését is eredményezi.

A vizsgálatok eredményeinek összefoglalásaként megállapítható:

A Kubelka-Munk (K-M) függvény csak feltételekkel alkalmazható a fényt erősen abszorbeáló faanyagokra. A K-M elmélet faanyagokra jól alkalmazható, ha a mért K-M egységek nem haladják meg a 12 értéket. A 40 K-M egység alatti esetekben már csak akkor alkalmazhatjuk a K-M függvényt az abszorpcióváltozás meghatározására, ha a vizsgált sáv közelében van olyan hasonló intenzitású sáv, amelyik az adott kezelés során nem változik. Ilyenkor a K-M függvényeket ezen a helyen egymáshoz normálva, a K-M függvény nem lineáris voltából eredő anomália minimálisra csökkenthető. A 40 K-M egységet meghaladó esetekben a K-M elmélet a faanyagokra nem alkalmazható.

Kimutattuk, amennyiben a K-M elmélet a faanyag felületének nagyfokú érdessége miatt nem alkalmazható, akkor alkalmas felületi összenyomással ez a felületi érdesség a megfelelő mértékűre csökkenthető, és az elmélet alkalmazhatóvá válik.

Tézisek

Gőzölési vizsgálatok eredményei:

1.1. Kimutattuk, hogy a gőzölés okozta színváltozás tekintetében nincs lényeges eltérés mag eredetű és a sarj eredetű faanyagok között.

1.2. Megállapítottuk, hogy az akác faanyag színváltozása erősen függ a gőzölési hőmérséklettől. Ezért a reprodukálható szín eléréséhez gőzöléskor a hőmérsékletet állandó értéken kell tartani.

Objektív színméréssel feltártuk a gőzölési paraméterek és a színváltozás kapcsolatát.

Megállapítottuk, hogy a hőmérséklet növelésével a faanyag sötétedése egyre erőteljesebb. 100°C alatt a kezdeti gyors sötétedést egyre lassuló, de folyamatos sötétedés követi. 100°C fölött viszont a kezdeti erőteljes változás után a sötétedés egy közös értékhez tart, melyet a hőmérséklet növelésével egyre rövidebb idő alatt ér el. Ezen időtartam után a gőzölés már hatástalan.

Kimutattuk, hogy nem változik a sárga színezet a gőzölés első napján, ha a hőmérséklet 100°C alatt van. Ezt követően a sárga színezet folyamatosan csökken. A 100°C fölötti hőmérsékleteken a sárga színezet csökkenése hasonlóan történik, mint a világosság csökkenése.

Megállapítottuk, hogy az akác faanyag vörös színezete a gőzölés során jelentősen növekszik, javítva az esztétikai hatást. A színezetváltozást leíró függvényeknek maximumuk van, ami arra utal, hogy a színeképző vegyületek egy részét a gőz kioldja a fából. A kioldó hatás a hőmérséklet emelésével fokozódik, ezért a maximum helye a hőmérséklet-emelkedéssel egyre rövidebb időpontokhoz vándorol. A gőzölési gyakorlat számára fontos megállapítás, hogy az adott hőmérsékletre tartozó maximumnál tovább a gőzölést nem érdemes folytatni (Tolvaj és munkatársai 2004).

Kimutattuk, hogy a gőzölés az akác faanyag esetében színhomogenizáló hatású. A hőmérséklet emelése és a gőzölési idő növelése egyaránt segíti a színhomogenizálást. A három színkoordináta közül a világosság szórásának csökkenése a legjelentősebb (Tolvaj és munkatársai 2000, 2005).

- 1.3. Kísérletekkel igazoltuk, hogy a száraz állapotú akác faanyag is jól gőzölhető. Ha a gőzölési hőmérséklet meghaladja a 95°C-t, akkor a színváltozás nem függ a faanyag nedvességtartalmától. A 95°C alatti hőmérsékleteken viszont a száraz faanyag színváltozása lassúbb, mint a nedves faanyagé
- Kimutattuk, hogy a száraz kiinduló állapotot követő gőzölés során a faanyag vesz fel 5-6%-nyi nedvességet, de az így felvett víz egyheti laboratóriumi hőmérséklet és páratartalom melletti tárolásnál képes eltávozni. A gyakorlat számára fontos eredmény, hogy a száraz állapotban gőzölt akác faanyag a gőzölés után nem igényel újabb mesterséges szárítást, amennyiben a gőzölést követő technológiai folyamat nem kíván 10-12%-nál alacsonyabb nedvességtartalmat (Tolvaj és munkatársai 2002, Tolvaj 2005).
2. Feltártuk, hogy gőzöléskor a bükk faanyag színváltozásának döntő része 18-20 óra alatt lejátsszódik. Ez a színváltozás 95°C alatt nem függ a gőzölési hőmérséklettől. A 95°C fölötti hőmérsékleteken a színváltozás nem áll meg az első nap után, hanem tovább folytatódik, de a keletkező szín egyre szürkébb, nem tetszetős árnyalatú lesz. Ezek a hőmérsékleteken a gőzölési idő és a hőmérséklet növelésével egyre sötétebb de egyre szürkébb színek érhetők el (Tolvaj 2005).
- Kimutattuk, hogy a gőzölés alkalmas a színes álgesztet is tartalmazó bükk faanyag színének homogenizálására, mert a fehér részek színe az álgesztes színéhez közeledik, miközben az álgesztes anyag színe alig változik (Tolvaj 2005).
3. Kísérletekkel igazoltuk, hogy a jellegtelen, szürkésfehér gyertyán faanyagot lehet nemesíteni gőzöléssel. A gőzölés hatásos időtartama 100°C alatti gőzölésnél 2 napnak adódott. Az eredményként egy enyhén sárgás, világosbarna színárnyalatot kaptunk.
- Feltártuk, hogy a színváltoztatás 2 nap után is folytatható, ha a gyertyán faanyagot akác vagy bükk faanyaggal gőzöljük együtt (Még nem publikált eredmény).
4. Megállapítottuk, hogy a cser faanyag a gőzölés során a bükkhöz hasonlóan alig érzékeny a gőzölési hőmérsékletre, ezért az alacsony (100°C alatti) hőmérsékletek alkalmazása javasolható.
- Kimutattuk, hogy gőzölés a csertölgy gesztjének jellegtelen szürkésbarna színét sötétíti és karakteres barna színné alakítja. Vele párhuzamosan a geszthez képest elütően világos szijács is kellemes barnás színárnyalatot vesz föl, mely a gesztéhez

hasznos színárnyalat lesz. Ezáltal megvalósul a színhomogenizálás a geszt és a szíjács között. A színhomogenizálás 100°C fölötti hőmérsékleteken már 8-10 óra alatt megtörténik, 100°C alatt ugyanez 12-20 órát igényel (Molnár és Tolvaj 2004).

5. Megállapítottuk, hogy a víznek meghatározó szerepe van a faanyagok termikus kezelésénél. A vízgőz jelenléte jelentősen felgyorsítja a termikus kezelés során lejátszódó színváltozást. Azt is kimutattuk, hogy a jelenlévő gőz kioldja a színképző vegyületeket. Egy, a fafajtól függő idő után a kioldódás kerül túlsúlyba az elszíneződéssel szemben. Ezen idő lehet a gőzölési idő felső határa (Tolvaj 1994/b, Tolvaj és munkatársai 2004).
6. Az infravörös színeképek segítségével feltártuk, hogy a gőzölés során a nemkonjugált helyzetű karbonilcsoportok abszorpciójában először csökkenés áll be, amit az 1720 cm^{-1} hullámszám körüli abszorpciónövekedés követ. Ehhez időben később csatlakozik az 1780 cm^{-1} hullámszám körüli abszorpciónövekedés is (Még nem publikált eredmény).
7. Megállapítottuk, hogy az akác faanyag gőzöléssel létrehozott színe nem időjárásálló. Már egyéves kitettség során teljesen elveszíti a színét és ugyanolyan szürke lesz, mint az azonos ideig kitett natúr akác vagy tölgy faanyag (Tolvaj és Papp 1999).

Fotodegradációs vizsgálatok eredményei:

8. Kísérletekkel kimutattuk, hogy fotodegradáció hatására létrejövő nem konjugált helyzetű karbonil csoportok 1745 cm^{-1} hullámszám környéki abszorpciónövekedése legalább két sávból tevődik össze. Eleinte az 1710 cm^{-1} körüli sáv növekszik erőteljesebben, de a besugárzási idő növelésével azt megelőzi az 1760 cm^{-1} hullámszám körüli sáv növekedése. Feltártuk, hogy a víz kimossa a faanyag felszínéről a fotodegradáció során keletkezett karbonilcsoportokat tartalmazó vegyületeket. Az 1760 cm^{-1} hullámszám környékén abszorbeálók nagyobb mértékben kioldhatók, mint az 1710 cm^{-1} környékén abszorbeálók (Tolvaj és Faix 1995, Tolvaj és Horváth 1995).

9. Megállapítottuk, hogy az 1173 cm^{-1} -es hullámszámnál lévő sáv intenzitása függ a vizsgáló fénynek a rostiránnyal bezárt szögétől. A merőleges helyzetben az intenzitás nagyobb, mint a párhuzamos helyzetben. A jelenséget a sejtüreg és az átmetszett sejtfal eltérő abszorpciójával magyaráztuk. Hiszen a két felület látható részének aránya ferde megfigyelésnél (melyet a spektrofotométerek alkalmaznak) függ a megfigyelés irányától (Tolvaj és Mitsui 2004).

10. A természetes és a mesterséges fényforrások hatásának összehasonlítására elsőként végeztünk olyan kísérleteket, ahol a szabadba kitett mintákat csak napsugárzás érte, egyéb behatás (például: eső) nem. Továbbá a kezelési idő valóban csak napsütéses órákat számoltuk bele. Megállapítottuk, hogy a xenonlámpa csak hosszúidejű kezelésnél alkalmas a napsugárzás imitálására. Rövid idejű (60 óránál rövidebb) kezelésnél a xenonlámpa lényegesen nagyobb sárgulást okoz, mint a napsugárzás és a karbonilcsoportokat tartalmazó vegyületek keletkezésében is eltérések vannak. Kimutattuk, hogy a higanygőzlámpa nem alkalmas a napsugárzás imitálására (Tolvaj és Mitsui 2005).
Kimutattuk, hogy a lézerek felhasználása nem alkalmas a napsugárzás imitálására, de jól használható a fotodegradáció jelenségeinek megértéséhez. Segítségükkel kimutattuk, hogy a metilcsoportok degradációja a xenonlámpás besugárzásnál azért nem figyelhető meg, mert az általa kibocsátott fény fotonjainak energiája nem elegendő a kémiai kötések felszakításához, míg higanygőzlámpás besugárzásnál ez megtörténik. Kísérleteinkkel sikerült láthatóvá tenni az $1550\text{-}1630\text{ cm}^{-1}$ hullámszám tartományban egymást átfedő és a fotodegradáció hatására ellentétesen változó sávokat (Még nem publikált eredmény).

11. Kimutattuk, hogy a szijács és a geszt korai és késői pásztájának a fotodegradációval szembeni érzékenysége eltérő. Legsérülékenyebb a szijács korai pásztája, melyet a geszt korai pásztája követ. Ezeknél jobb az ellenálló képessége a szijács késői pásztájának. A legkevésbé érzékeny a fotodegradációval szembeni a geszt késői pásztája. Vörösfenyőnél például ennek a pásztának a károsodása alig mérhető (Tolvaj 1994/a)

12. A Kubelka-Munk (K-M) függvény elemzése és sok kísérleti eredmény értékelése után meghatároztuk, hogy a K-M elmélet faanyagokra jól alkalmazható, ha a mért K-M egységek nem haladják meg a 12 értéket. A 40 K-M egység alatti esetekben már csak akkor alkalmazhatjuk a K-M függvényt az abszorpcióváltozás meghatározására, ha a vizsgált sáv közelében van olyan hasonló intenzitású sáv, amelyik az adott kezelés során nem változik. Ilyenkor a K-M függvényeket ezen a helyen egymáshoz normálva, a K-M függvény nem lineáris voltából eredő anomália minimálisra csökkenthető. A 40 K-M egységet meghaladó esetekben a K-M elmélet a faanyagokra nem alkalmazható

Kimutattuk, amennyiben a K-M elmélet a faanyag felületének nagyfokú érdessége miatt nem alkalmazható, akkor a felület összenyomásával ez a felületi érdesség a megfelelő mértékűre csökkenthető (Még nem publikált eredmény).

Az eredmények ipari és mérés technikai hasznosítása

A következő kutatási eredmények a gőzölési gyakorlatban közvetlenül felhasználhatók, részben már bevezetésre is kerültek (pl.: GRABOPARKETT).

Kimutattuk, hogy az akác faanyag gőzölésénél a gőzölés hőmérsékletét konstans értéken kell tartani a gőzölő berendezés teljes térfogatában. Ez a fő záloga a színreprodukálásnak. A 95°C alatti hőmérsékleteken a faanyag kiindulási nedvességtartalmának a rosttelítettség fölött kell lennie. Ha ez nem teljesül, akkor a gőzölési időt meg kell nyújtani. Amennyiben a gőzölendő faanyag nedvességtartalma inhomogén, akkor csak 100 C fölötti hőmérsékletek alkalmazása javasolható. A gőzölés során gondoskodni kell róla, hogy a gőzölőtérben mindig telített vízgőz legyen (a felfűtés során is). Ellenkező esetben a faanyag berepedezik.

A világos színárnyalatok eléréséhez a 100°C alatti, a sötét színekhez a 100°C fölötti hőmérsékletek javasolhatók. A 80°C körüli gőzöléssel 8-10 nap alatt kellemes, vörösesbarna árnyalat érhető el. A javasolt gőzölési idő 90°C-on 6-8 nap, 100°C-on 3-4 nap, 110°C-on 1 nap, 120°C-on 12 óra, 130°C-on 6 óra. Az akác faanyag színhomogenizálásához a magasabb 95 C fölötti hőmérsékletek javasolhatók.

Mivel túlnyomásos gőzöléssel a száraz akác faanyag problémamentesen gőzölhető, kínálkozik a vákuumszárítás és a túlnyomásos gőzölés egymás utáni elvégzése ugyanabban a nyomásálló tartályban. Ennek előnye, hogy az átrakás kiiktatódik, és a szárítás utolsó, feszültségmentesítő szakaszát a gőzölés megoldja.

Kimutattuk, hogy az akác faanyag eredete (sarj vagy mag eredetű) nem befolyásolja számottevően a gőzölési tulajdonságokat. Ezért a gőzölendő rakatok összeállításánál a faanyag eredetére nem kell tekintettel lenni.

Kimutattuk, hogy az akác faanyag, a hazai keménylombos faanyagok közül egyedül, a sötét trópusi fafajokhoz hasonló sötét színűre gőzölhető. Ezzel a felismeréssel az akác faanyag a sötét színű trópusi faanyagok helyettesítő faanyagává válhat.

A bükk faanyag gőzöléskori színváltozása 95 C alatt nem érzékeny a hőmérsékletre, ezért a gazdaságosságra tekintettel a 90 C körüli hőmérsékletek javasolhatók. Itt nem jelent problémát a hőmérséklet-ingadozás. A száraz bükk faanyag gőzölése és a 100 C fölötti hőmérsékletek alkalmazása nem javasolt. Bár ekkor is történik színváltozás, de kedvezőtlen, szürkés árnyalatok keletkeznek. A gőzölés jól alkalmazható a színes álgesztet is tartalmazó bükk faanyag eltérő színárnyalatainak közelítésére, mivel az

álgeszt színe alig változik, de a fehér faanyag színe az álgeszt színének irányába tolódik el. A javasolt paraméterek: 95 C és 18-20 órás gőzölési idő.

A gyertyán faanyag jellegtelen szürkésfehér színe gőzöléssel sötétíthető. Ez a folyamat atmoszférikus nyomáson 2 nap után megáll. Ha a gőzölőben a gyertyán faanyag mellett akác vagy bükk faanyagot is elhelyezünk, akkor az elszíneződés lassan tovább folytatódik.

A csertölgy értékes fehér szijácsa gőzöléssel vörösesbarnává modifikálható, miközben a geszt is hasonló színt vesz fel. A csertölgy a gőzölésnél hasonlóan viselkedik, mint a bükk. Előnyös eltérés, hogy a cser faanyag túlnyomáson is jól gőzölhető. A színhomogenizáláshoz javasolt gőzölési idő 100°C alatt 12-24 óra, 100°C fölött pedig 8-10 óra.

Kimutattuk, hogy a Kubelka-Munk elmélet faanyagokra jól alkalmazható, ha a mért K-M egységek nem haladják meg a 12 értéket. A 40 K-M egység alatti esetekben már csak akkor alkalmazhatjuk a K-M függvényt az abszorpcióváltozás meghatározására, ha a vizsgált sáv közelében van olyan hasonló intenzitású sáv, amelyik az adott kezelés során nem változik. Ilyenkor a K-M függvényeket ezen a helyen egymáshoz normálva, a K-M függvény nem lineáris voltából eredő anomália minimálisra csökkenthető. A 40 K-M egységet meghaladó esetekben a K-M elmélet a faanyagokra nem alkalmazható. Az ilyen esetekben a vizsgált felületnek a felületre merőleges összenyomása segítségével hívható.

Megállapítottuk, hogy az infravörös színekben az 1173 cm^{-1} -es hullámszámnál lévő sáv intenzitása függ a vizsgáló fénynek a rostiránnyal bezárt szögétől. Ezért az összehasonlító méréseknél a mintákat mindig ugyanabban a pozícióban kell a spektrofotométerbe betenni.

Vizsgálati módszert dolgoztunk ki az infravörös különbségi színekp korrekt meghatározására. Segítségével a faanyagok fotodegradációja és termikus degradációja során létrejövő kémiai változások az eddiginél pontosabban nyomon követhetők.

Irodalomjegyzék

- Albert L., Hofmann T., Németh ZS., Rétfalvi T., Koloszar J., Varga Sz., Csepregi I. (2003)
Radial variation of total phenol content in beech (*Fagus sylvatica* L.) wood with and without red heartwood
Holz als Roh- und Werkstoff 61, 227-230
- Arnold, M., J. Sell, W. C. Feist (1991)
Wood weathering in fluorescent ultraviolet and xenon arc chambers
Forest Products Journal 41 (2) 40-44.
- Bokler, H.I., N.G. Somerville (1963)
Infrared spectroscopy of lignins Part II. Lignins in unbleached pulps
Pulp Pap. Mag. Canada 64 T187-T193.
- Collier, W. E., T. P. Shultz and V. F. Kalasinsky (1992)
Infrared study of lignin: reexamination of aryl-alkyl ether C-O stretching peak assignment
Holzforschung 46 (6) 523-528.
- Chow, S. Z. (1972)
Infrared spectral study of wood tissues from four conifers
Wood Science 5 (1) 27-33.
- Derbyshire, H, E. R. Miller, H, Turkulin (1995)
Investigation into the photodegradation of wood using microtensile testing Part 1. The application of microtensile testing to measurement of photodegradation rates
Holz als Roh- und Werkstoff 53, 339-345.
- Derbyshire, H, E. R. Miller, H, Turkulin (1995)
Investigation into the photodegradation of wood using microtensile testing Part 2. An investigation of the changes in tensile strength of different softwood species during natural weathering
Holz als Roh- und Werkstoff 54, 1-6.
- Derbyshire, H, E. R. Miller, H, Turkulin (1995)
Investigation into the photodegradation of wood using microtensile testing Part 3: The influence of temperature on photodegradation rates
Holz als Roh- und Werkstoff 55, 287-291.
- Dessewffy I-né (1964):
Az akác anyagának hidrotermikus kezelése
Kutatási jelentés, FAKI.
- Dirckx, O. G., D.M. Masson, X. M. Deglise (1987/a)
Photodegradation du bois, de la cellulose et de la lignine
Wood and Pulping Chem. Simp. Paris

- Dirckx, O. G., D.M. Masson, X. M. Deglise (1987/b)
Photooxydation du bois
Wood and Pulping Chem. Simp. Paris
- Faix, O. and O. Beinhoff (1988)
FTIR spectra of milled wood lignin and lignin polimer models (DHP's) with enhanced resolution obtained by deconvolution
J. Wood Chem. Technol. 8 (4) 505-522
- Faix, O. (1991)
Classification of Lignin from Different Botanical Origins
Holzforschung 45 Supplement 21-27.
- Faix, O. and J. H. Böttcher (1992)
The influenc of particle size and concentration in transmission and diffuse reflectance spectroscopy of wood
Holz Roh- Werkstoff 50 221-226.
- Forsskåhl, I. and J. Janson (1992)
Sequential treatment of mechanical and chemimechanical pulps with light and heat. Part 2. FTIR and UV-VIS absorption-scattering spectra
Nordic Polp Paper Res. J. 7 (2) 48-54.
- Häckel, H. (1999)
Meteorologie (4. Auflage)
Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart
- Hembree, D. M. and H. R. Smyrl (1989)
Anomalous Dispersion Effects in Diffuse Reflectance Infrared Fourier Transform Spectroscopy: A Study of Optical Geometries
Applied Spectroscopy 43 267-274
- Hergert, H. L. (1971)
Infrared spectra *In: Lignins, Occurrence, Formation, Structure and Formation*, Eds. Sarkanen, K. V. and C. H. Ludvig, Wiley-Interscience New York 267-298.
- Hess C. L. (1952)
An investigation of the homogeneity of isolated native Black spruce lignin
Tappi 35 (7) 315-319.
- Hofmann T., Albert L., Rétfalvi T., Bányai É., Visiné Rajczi E., Börcsök E., Németh ZS., Koloszar J., Varga Sz., Csepregi I. (2002)
A peroxidáz és a polifenol-oxidáz enzimek aktivitásának sugárirányú vizsgálata az álgesztes bükkben (*Fafus sylvatica* L.)
NyME Kémiai Intézet Tudományos Ülése (november 7.) 102-106.

- Hofmann T., Albert L., Rétfalvi T. (2004)
Quantitative TLC Analysis of (+)-Catechin and (-)-Epicatechin from *Fafus sylvatica* L. with and without Red Heartwood
Journal of Planar Chromatography 17, 350-354.
- Hon, D. N. S. and G. Ifjú (1978)
Measuring penetration of light into wood by detection of photo-induced free radicals
Wood Sciences 11 (2) 118-127.
- Hon, D. N. S. (1983)
Weathering reactions and protection of wwood surfaces
J. Appl. Polym. Sci.: Appl. Polym. Symp. 37. 845-864.
- Hon, D. N. S. and S. T Chang (1984)
Surface degradation of wood by ultraviolet light
J. Polym Sci.: Polym Chem Ed. 22 2227-2241.
- Hon, D. N. S. and W. C. Feist (1986)
Weathering caracteristics of hardwood surfaces
Wood Sci. and Technol. 20 169-183.
- Hon, D. N. S (1991)
Photochemistry of wood. In: Hon DNS, Shiraishi N (eds) Wood and cellulosic chemistry.
Marcel Dekker, New York, pp 525-555
- Horn, B. A., J. Qiu, N. L. Owen, W. C. Feist (1994)
FT-IR Studies of Weathering Effects in Western Redcedar and Southern Pine
Applied Spectroscopy 48 (6) 662-668.
- Horváth-Szováti E. (2000/a):
Az akác faanyag gőzölése során bekövetkező színváltozás vizsgálata
Doktori (Ph.D.) értekezés , NYME Sopron
- Horváth-Szováti E. (2000/b):
A gőzölt akác világosság-változásának hőmérséklet- és időfüggése
SE Tudományos Közleményei 46 179-189
- Horváth-Szováti E., Varga D. (2000):
Az akác faanyag gőzölése során bekövetkező színváltozás vizsgálata II. A 105, 110 és 115°C-on történő gőzölés eredményei, javaslat az ipari hasznosításra
Faipar (4) 11-13
- Jones, H. G. and C. Heitner (1973)
Optical Measurement of Absorption and Scattering Properties of Wood Using the Kubelka-Munk Equations
Pulp and Paper Magazine Canada 74 T182-T186

- Kataoka, Y. and M. Kiguchi (2001)
Depth profiling of photo-induced degradation in wood by FT-IR microspectroscopy.
J. Wood Sci. 47:325-327
- Kollmann, F. R. Keylwerth, H. Kübler (1951):
Verfaerbungen des Vollholzes und der Furniere bei der künstlichen Holzrackung
Holz als Roh- und Werkstoff 9 (10), 382-391.
- Kollmann, F. (1969):
Gefüge- und Eigenschaftsaenderungen im Holz durh mechanische und termische Beanspruchung
Holz als Roh- und Werkstoff 27 (11), 407-425.
- Kovács I.-Molnár S. (1980):
A gőzölés hatása az akác műszaki tulajdonságaira
Az Erdő, 1980. március, 103-107.
- Kubelka, P. and F. Munk (1931)
Ein Beitrag zur OPTik der Farbanstriche
Zeitschrift für technische Physik (12) 593-601.
- Kubelka P. (1948)
New Contributions to the Optics of Intensely Light-Scattering Materials. Part I.
Journal of the Optical Society of America 38 (5) 448-457.
- Kucera, L., S. Katuscak (1992)
Das Phenomen Holzfarbe Holz-Farbe-Gestaltung,
24. Fortsbildungskurse der Schweizerischen Arbeits-gemeinschaft für Holzforschung (SAH) in Weinfelden. (4-5 November) Zürich 43-52.
- Lukács Gy. (1982)
Színmérés
Műszaki Könyvkiadó , Budapest 125-262.
- Marchessault, R. H. (1962)
Application of infrared spectroscopy to cellulose and wood polysaccharides
Pure Appl. Chem. 5 107-129.
- Marton, J. and H. E. Sparks (1967)
Determination of lignin in pulp and paper by infrared multiple internal reflectance
Tappi 50 (7) 363-367.
- Masuda, M. (2001)
Why human loves wood grain figure? Extraction of vision-physical characteristics deeply related to impression
ICWSF 2001 Conference (5-7 September) Ljubljana 11-23.
- Michell, A. J., H. D. Ingle, C. M. Stewart (1969)
Infrared spectra of some woods of taxonomic interest
Wood Science 5 (1) 27-33.

- Michell, A. J. (1988/a)
 Infra-red spectroscopy transformed- New applications in wood and pulping chemistry
 Appita Journal 4 (5) 375-380.
- Michell, A. J. (1988/b)
 Second derivative FTIR spectra of woods
 10th Cell. Conf. Syracuse
- Michell, A. J (1991)
 An anomalous effect in the DRIFT spectra of woods and papers
 Journal of Wood Chemistry and Technology 11 (1) 33-40
- Mitsui, K., H. Takada, M Sugiyama, R. Hasegawa (2001)
 Changes in the Properties of Light-Irradiated Wood with Heat Treatment. Part 1. Effect of Treatment Conditions on the Change in Color
 Holzforschung 55 (6) 601-605
- Mitsui, K. (2004a)
 Changes in the properties of light-irradiated wood with heat treatment. Part 2. Effect of light-irradiation time and wavelength.
 Holz als Roh und Werkstoff 62 23-30
- Mitsui, K., A. Murata, S, Tsuchikawa, M. Kohara (2004/b)
 Wood Photography Using Light Irradiation and Heat Treatment
 Color Research and Application 29 (4) 312-316
- Mitsui, K., S. Tsuchikawa (2005)
 Low Atmospheric Temperature Dependence on Photodegradation of Wood
 Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology (megjelenés alatt)
- Molnár S. (1976):
 Akácfanemesítés Pusztavacson
 Az erdő 15 (11) 490-492
- Molnár S. (1979):
 A természetes állapotú és hőkezelt akác mechanikai megmunkálásának főbb technikai és technológiai jellemzői
 Műszaki doktori értekezés, Sopron
- Molnár S. és munkatársai (1987):
 Az akácfa gőzölésének célja és hatása a faanyag tulajdonságaira
 Kutatási jelentés, EFE Fizika-Elektrotechnika Tanszék
- Molnár S. és munkatársai (1994):
 Az akácfa hidrotermikus nemesítése atmoszférikus könnyűszerkezetes gőzölő kamrában
 Kutatási jelentés, EFE Faanyagismerettani Tanszék

Molnár S. (1998):

Die technischen Eigenschaften und hydrotermische Behandlung des Robinienholzes
In: Die Robinie Rohstoff für die Zukunft (Erfahrungen und Forschungsergebnisse),
Redaktor: Molnár, S.
Stiftung für die Holzwissenschaft, Budapest 50-63.

Molnár S., L. Tolvaj (2004)

Colour homogenisation of different wood species by steaming
3rd International Symposium "Interaction of Wood with Various Forms of Energy"
(21- 22 Oct.), Zvolen, Slovakia

Müller, U., M. Rätzsch, M. Schwanninger, M. Steiner, H. Zöbl

Yellowing and IR-changes of spruce wood as result of UV-irradiation
J. Photochem. Photobiol., B: Biology 69 97-105.

Németh K. (1981/a):

Színmérés a faiparban I. A természetes fa színmeghatározása
Faipar 31 (9), 257-261.

Németh K. (1981/b):

Színmérés a faiparban II. Felületkezelés hatása a fa színére
Faipar 31 (9), 261-264.

Németh K. (1981/c):

Színmérés a faiparban III. Pácolás hatása a fa színére
Faipar 31 (12), 370-373.

Németh K. (1982):

A fa színének értékelése a CIELAB-rendszerben
Az Erdészeti és Faipari Egyetem Tudományos Közleményei (2) 125-135.

Németh K. (1984):

Színmérés a faiparban IV. A CIELAB színingermérő rendszer alkalmazása
Faipar 33 (5), 156-159.

Németh K. und O. Faix (1988/a):

Farbmessung zur Beobachtung der Photodegradation des Holzes
Holz als Roh- und Werkstoff 46 (12), 472.

Németh, K. (1988/b):

Die abiotische Degradation des Akazienholzes
Grundforschung zur komplex Holznutzung. VII. Symp. Smolenyce (1988)

Németh K. (1989):

A faanyag abiotikus degradációja
Doktori Értekezés, Sopron.

Németh K. und O. Faix (1994)

Beobachtung der Photodegradation des Holzes durch quantitative DRIFT – Spektroskopie
Holz als Roh- und Werkstoff 52, 261-266.

Németh K. (1998):

A faanyag degradációja
Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, Budapest.

Németh K., L. Molnár-Hamvas, J. Stipta (2003)

Kinetic interpretation of processes in wood at mild temperature
Wood Science and Technol. 305-308

Ohkoshi M. (2002)

FTIR-PAS study of light-induced changes in the surface of acetylated or polyethylene glycol-impregnated wood
Journal of Wood Sciences 48, 394-401.

Ota, M., H. Ogata, Y. Jono, K. Hirota, K. Abe (1997)

Light-Induced Color Changes of Acetylated Veneers of Kiri (*Paulowniatomentosa Steud.*).
Mokuzai Gakkaishi 43, 785-791

Patzelt, M., G. Emsenhuber, R. Stingl (2003)

Colour Measurement as means of Quality Control of Thermally Treated Wood
European Conf. on Wood Modification Gent 213-218.

Pandey, K. K. and K. S. Theagarajan (1997)

Analysis of wood surfaces and ground wood by diffuse reflectance (DRIFT) and photoacoustic (PAS) Fourier transform infrared spectroscopic techniques
Holz als Roh und Werkstoff 55, 383-390

Pandey, K. K. and D. P. Khali (1998)

Accelerated Weathering of Wood Surfaces Modified by Chromium Trioxide
Holzforschung 52 (5) 467-471.

Phelps, J.E., E.A. Mc Ginnes, HE Garrett, GS Cox (1983/a):

Growt-quality evaluation of black-walnut wood P II. Color analyses of veneer produced on different sites
Wood Fiber Sci. 15(2) 177-185.

Phelps, J. E., E. A. Mc Ginnes (1983/b):

Growt-quality evaluation of black-walnut wood P. III. An anatomical study of color characteristic of black-walnut veneer
Wood Fiber Sci. 15(3) 212-218.

- Podgorski, L., A. Merlin, X. Deglise (1996)
 Analysis of the Natural and Artificial Weathering of a Wood Coating by
 Measurement of the Glass Transition Temperature.
 Holzforschung 50:282-287
- Rédei K. (1997)
 Az akáctermesztés kézikönyve
 ERTI Budapest 9-10. oldal
- Richter, H., J. Kühl (1998):
 Technische Farbanderung von Robinienholz – Vorteile und Einschränkungen
 In: Die Robinie Rohstoff für die Zukunft (Erfahrungen und Forschungsergebnisse),
 Redaktor: Molnár, S. Stiftung für die Holzwissenschaft Budapest, 64-66.
- Sarkanen, K. V., H. M. Change, G. G. Allan (1967)
 Species variation in lignins. II. Conifer lignins. III. Hardwood lignins
 Tappi 50 (12) 583-590.
- Stubenvoll A. (1984):
 A gőzölés hatása a fa színének alakulására
 Faipar 37 (1)., 26-33.
- Sudiyani, Y., Y. Imamura, S. Doi, S. Yamauchi (2003)
 Infrared spectroscopic investigations of weathering effects on the surface of tropical
 wood
 Journal of Wood Sciences 49, 86-92.
- Sullivan, J. D. (1966):
 Color characterization of wood: Color parameters in individual species
 Forest Prod. J. 17(8) 25-29.
- Tolvaj L. (1994/a)
 Discoloration and deterioration of wood surface by ultraviolet light
 Wood Structure and Properties '94. Conf. (5-9 September) Zvolen, 177-182
- Tolvaj L. (1994/b)
 A faanyag optikai tulajdonságai. In: A faipari műveletek elmélete (Szerk.: Sitkei
 György) Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, Budapest 87-103.
- Tolvaj L., O. Faix (1995)
 Artificial Ageing of Wood Monitored by DRIFT Spectroscopy and CIE L*a*b*
 Color
 Measurements. I. Effect of UV Light
 Holzforschung 49 (5) 397-404
- Tolvaj L., E. Sz. Horváth (1995)
 Ultraviolet photodegradation of nonprotected wood material
 Reconstr. and Conserv. of Historical Wood Symposium (20-22. June) Zvolen, 51-
 58.

- Tolvaj L., O. Faix (1996)
Modification of Wood Colour by Steaming
ICWSF '96 Conference, (10-12 April) Sopron, 10-19
- Tolvaj, L., G. Papp (1999)
Outdoor Weathering of Impregnated and Steamed Black Locust
ICWSF'99 Conference, (14-16 July) Missenden Abbey (UK) 112-115
- Tolvaj, L., E. Horváth-Szováti, C. Sáfár (2000)
Colour modification of black locust by steaming
Wood Research (Drevarsky Vyskum) 45(2) 25-32,
- Tolvaj, L., D. Varga, Sz. Komán (2002)
Colour modification of dried black locust and beech woods by steaming
4th Int. Symp. Wood Structure and Properties '02
(1-3 September) Bystrá, Slovakia 109-113
- Tolvaj L., Molnár S., Takáts P., Varga D. (2004)
Az akác (*Robinia pseudoacacia* L.) faanyag színének változása a gőzölési idő és hőmérséklet függvényében
Faipar 52 (4) 9-14
- Tolvaj, L. and K. Mitsui (2004)
Surface preparation and direction dependence of DRIFT spectra of wood
Applied Spectroscopy 58 (9): 1137-1140
- Tolvaj L., Molnár S., Takáts P., Varga D. (2005)
Az akác (*Robinia pseudoacacia* L.) faanyag színének homogenizálása gőzöléssel
Faipar 53 (1) 13-15
- Tolvaj, L. and K. Mitsui (2005)
Light Source Dependence of the Photodegradation of Wood
Journal of Wood Science 51 (5)
- Tolvaj L. (2005)
Lombos faanyagok minőségjavítása hidrotermikus kezeléssel
In: Erdő - fa hasznosítás Magyarországon (Szerk.: Molnár Sándor)
Nyugat-Magyarországi Egyetem Sopron (kiadás alatt)
- Tsuchikawa, S., K. Hayashi, S. Tsutsumi (1996)
Nondestructive Measurement of the Subsurface Structure of Biological Material Having Cellular Structure by Using Near-Infrared Spectroscopy
Applied Spectroscopy 50 (9) 1117-1124
- Tsuchikawa, S., M. Torii, S. Tsutsumi (2001)
Directional Characteristic of Near Infrared Light Reflected from Wood
Holzforschung 55 (5) 534-540

- Weinhaus, O., P. Niemz, J. Fabian (1988)
 Untersuchungen zur Holzartendifferenzierung mit Hilfe der Infrarotspektroskopie.
 Teil I
 Holzforschung und Holzverwertung 40 (6) 120-125.
- Zavarin, E., S. J. Jones, L. G. Cool (1990)
 Analysis of solid wood surfaces by diffuse reflectance infrared Fourier transform
 (DRIFT) spectroscopy
 Journal of Wood Chemistry and Technology 10 (4) 495-513

Köszönetnyilvánítás

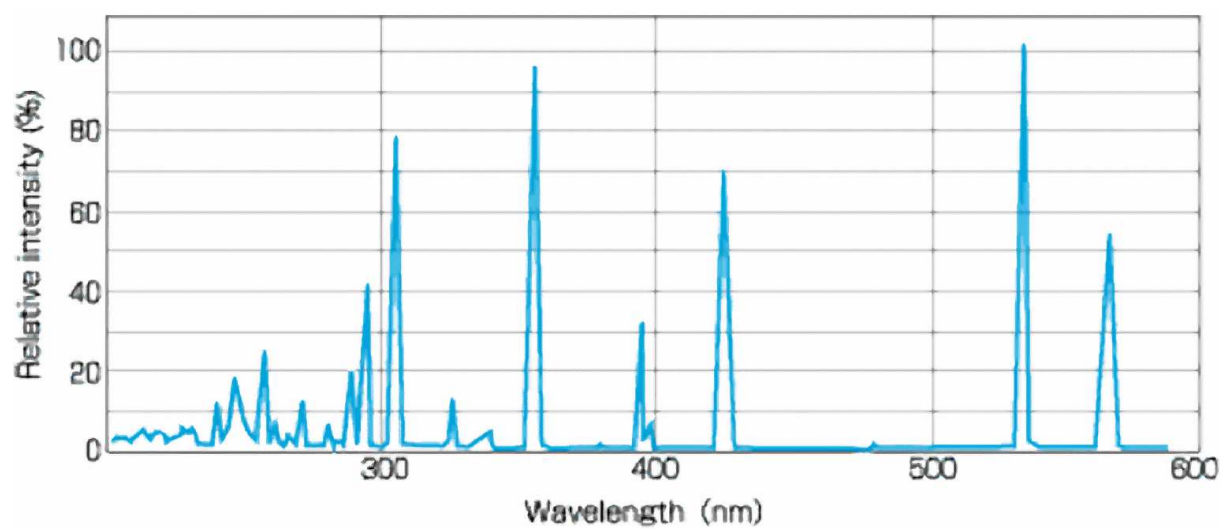
Köszönetünket fejezzük ki Nagy István technikusnak a laboratóriumi kísérletek elvégzéséhez nyújtott sokrétű közreműködésért, és Szőcs Évának az ábrák elkészítésénél nyújtott segítségért.

MELLÉKLETEK

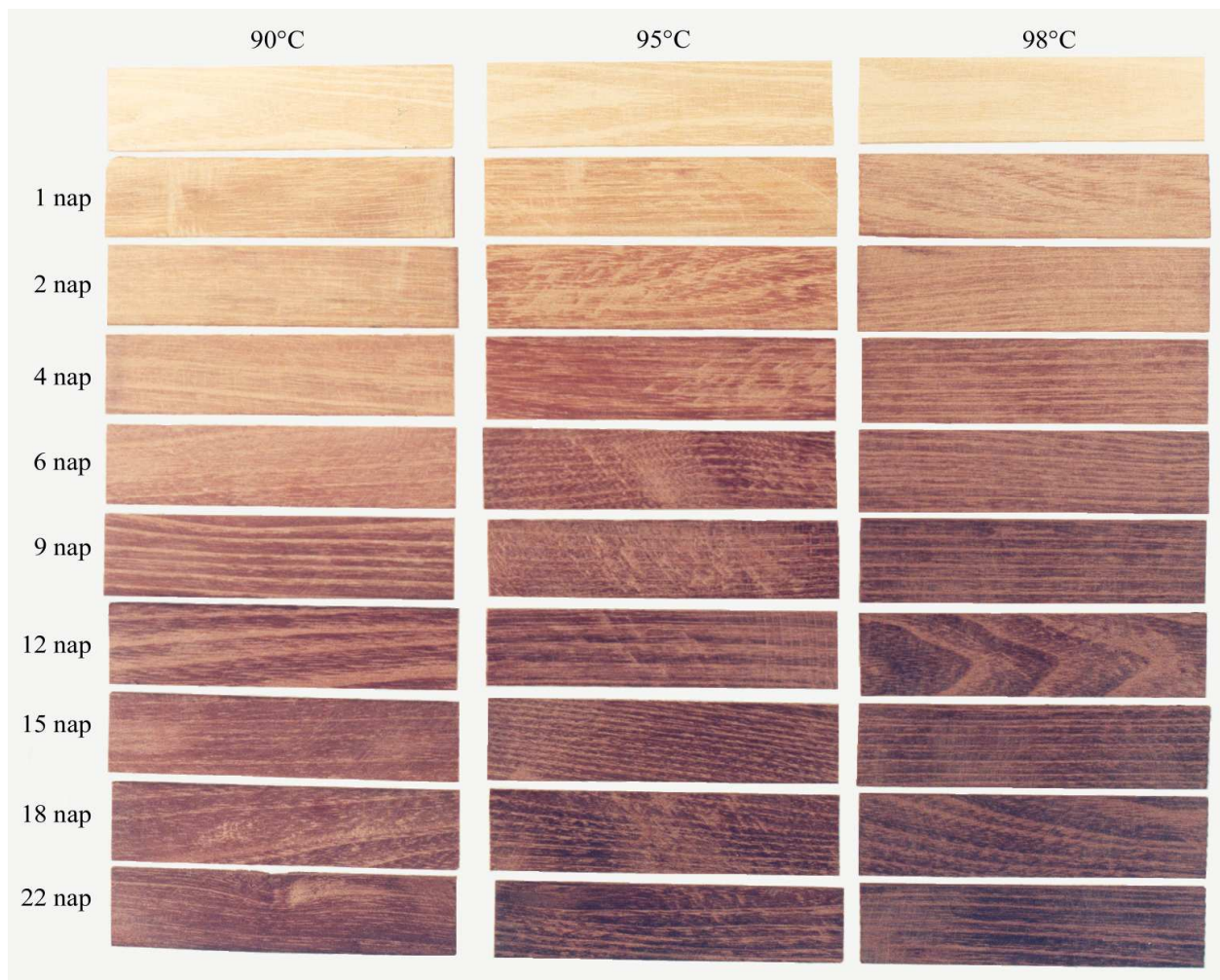
A munka illusztrálását szolgáló képek



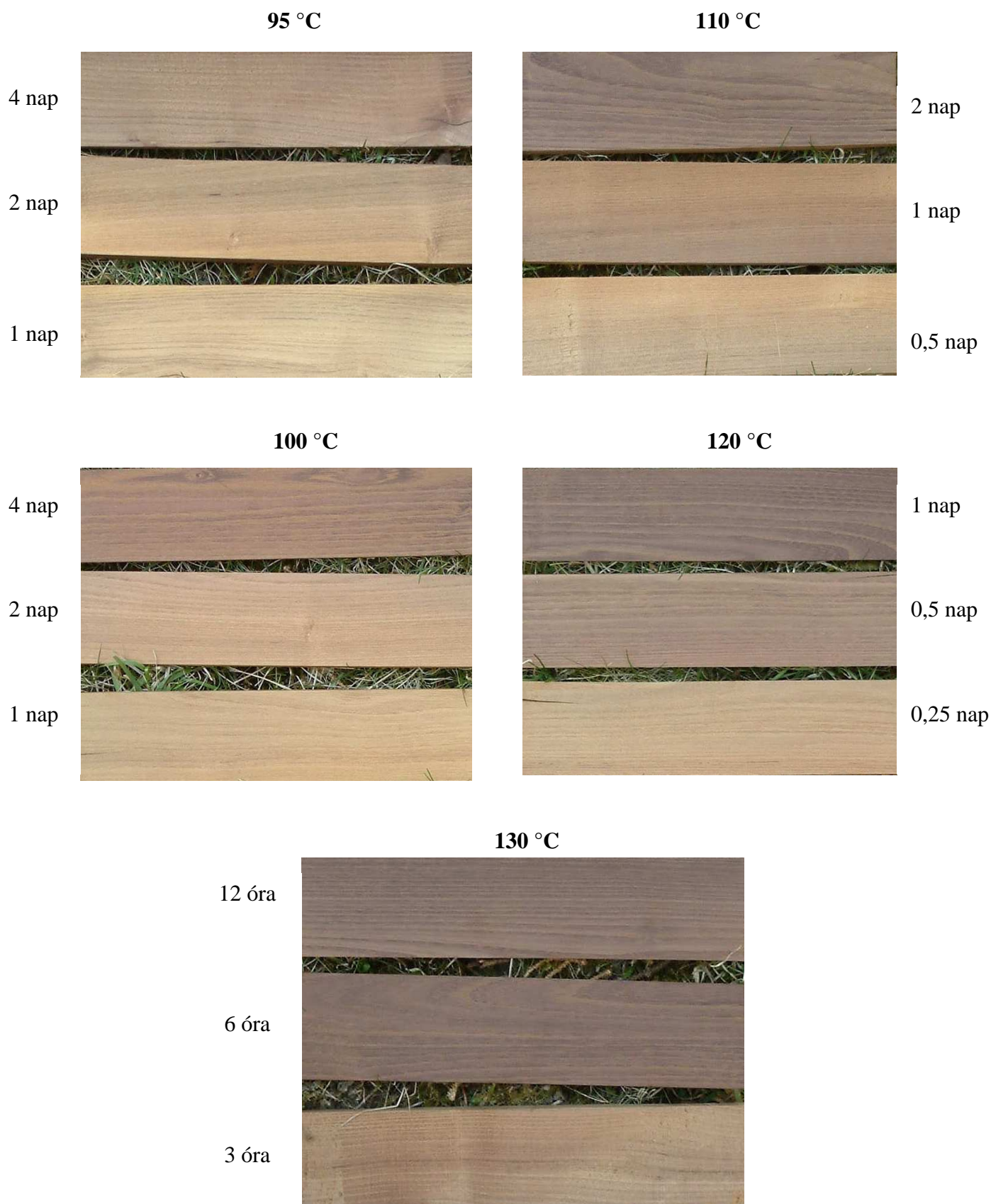
1. kép A hőmérséklet szabályzóval felszerelt autokláv



2. kép A 300 wattos higanygőzlámpa emissziós színeképe



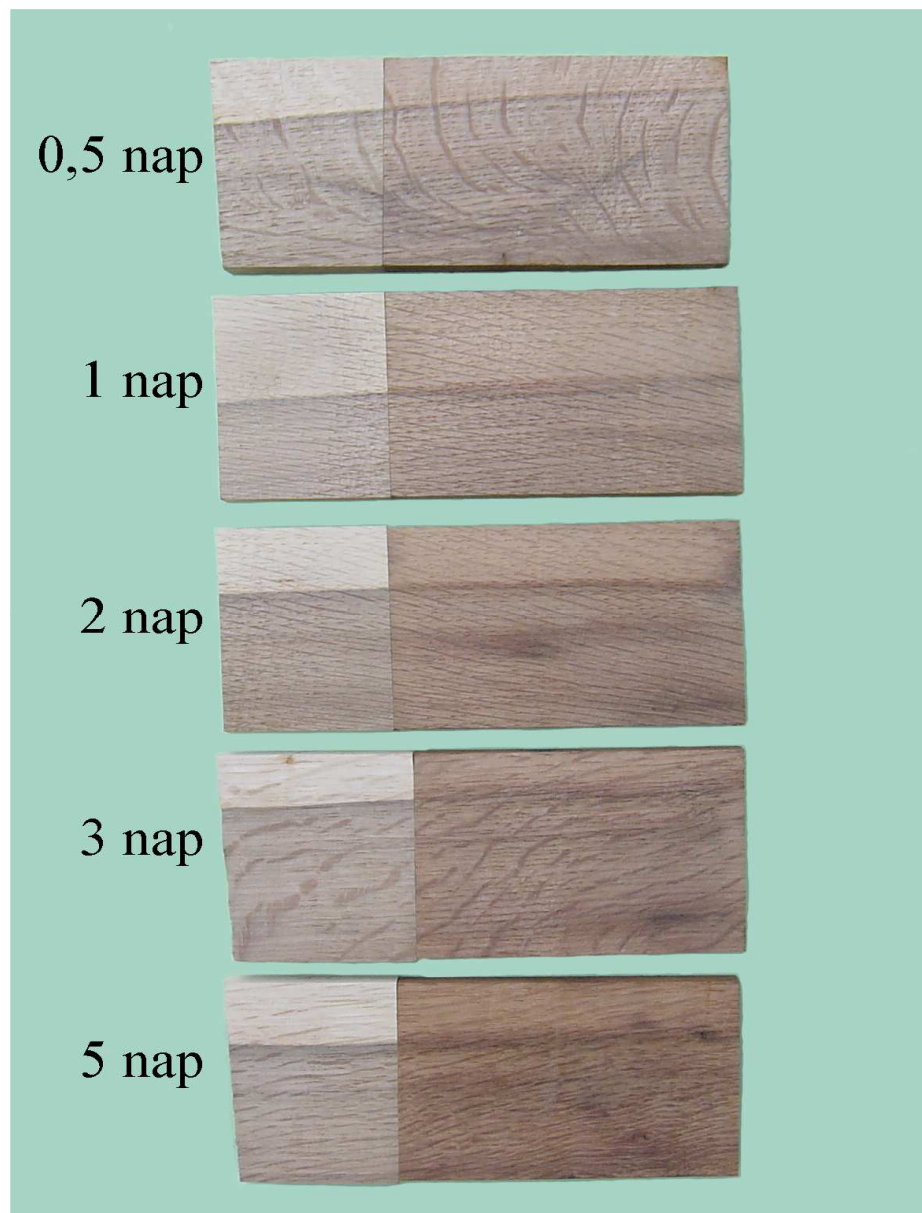
3. kép A nedves kiinduló állapotú, 90, 95 és 98°C-on gőzölt akácminták fényképe



4. kép A száraz állapotban gőzölt akácminták fényképei



5. kép A 80°C-on gőzölt álgesztes bükk minták színváltozása



6. kép A 95°C-on gőzölt csertölgy minták színváltozása



7. kép Egy japán templom időjárás viszontagságaiknak kitett egyik tartóoszlopának fényképe (valószínűleg gyertyánszil)



8. kép A szabadban lévő bütüfelület erodálódása (Japán ciprus)